

Sandro Carlos Lima

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE MÉTODOS DE
ESTIMAÇÃO DO RENDIMENTO DE MOTORES DE
INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Tese submetida ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Santa Catarina
para a obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Nelson Jhoe Batistela
Coorientador: Prof. Dr. Nelson Sadowski

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Lima, Sandro Carlos

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DO
RENDIMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS / Sandro
Carlos Lima ; orientador, Nelson Jhoe Batistela ;
coorientador, Nelson Sadowski. - Florianópolis, SC, 2016.
112 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Motor de indução trifásico.
3. Rendimento. 4. Algoritmos Genéticos. 5. Circuito
equivalente. I. Batistela, Nelson Jhoe . II. Sadowski,
Nelson . III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Sandro Carlos Lima

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE MÉTODOS DE
ESTIMAÇÃO DO RENDIMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “Doutor em Engenharia Elétrica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

Florianópolis, 15 de abril de 2016.

Prof. Carlos Galup Montoro, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr. - Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Nelson Sadowski, Dr. - Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Jaime Arturo Ramírez, Dr.
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Orlando José Antunes, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Patrick Kuo-Peng, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

A todos os colegas e membros do Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos – GRUCAD, pela calorosa acolhida e por propiciar um excelente ambiente de trabalho para o desenvolvimento desta Tese.

A Tractebel Energia, através do seu programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) regulamentado pela ANEEL, que viabilizou este trabalho através do projeto PD-0403-0034/2013, intitulado “Avaliação em campo de rendimento de motores de indução trifásicos”.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) pela oportunidade de capacitação disponibilizada a seus servidores, e aos colegas da instituição que direta e indiretamente cooperaram para a sua concretização.

Aos professores Nelson Jhoe Batistela e Nelson Sadowski, orientador e coorientador deste trabalho, pela cooperação, dedicação e paciência nestes anos de convívio. Certos que laços de amizade se formaram esperamos poder participar de novos projetos em conjunto.

Ao amigo Pedro Armando da Silva Jr. pelo incentivo e apoio neste trabalho.

A todos os membros da minha família pelo apoio e torcida para a conclusão deste trabalho. Em especial a Lucia, companheira desde os tempos da graduação, e aos filhos Lucas e Nicolas.

RESUMO

Nesta Tese, foi desenvolvida uma metodologia para a determinação do rendimento de motores de indução trifásicos em operação sem a necessidade de interromper o processo em que o mesmo está inserido ou alterar o seu ponto de funcionamento. São consideradas apenas medidas de grandezas elétricas, magnéticas e da velocidade de rotação do motor. A metodologia se baseia no método do circuito equivalente, sendo utilizada a técnica de algoritmos genéticos para o encontro dos valores dos seus parâmetros. Inicialmente, são determinados os valores dos parâmetros do modelo clássico do motor de indução a partir de dados de catálogo fornecidos por fabricantes. Relações heurísticas são utilizadas em conjunto com as equações do circuito do modelo do motor para diminuir o número de soluções possíveis do sistema. Para a etapa de campo, os valores dos parâmetros do modelo são ajustados utilizando as medidas realizadas com o motor em operação, e o rendimento é calculado. Um modelo alternativo é utilizado para considerar variações das perdas rotacionais e suplementares. A metodologia foi testada em motores de diferentes potências sendo os resultados comparados com métodos normatizados de determinação de rendimento de motores através de ensaios em laboratório.

Palavras-chave: Motor de indução trifásico. Rendimento. Algoritmos Genéticos. Circuito equivalente.

ABSTRACT

In this work, a methodology was developed to allow the determination of efficiency of three-phase induction motors without interrupting the process run by the machine or changing its working condition. Only electrical, magnetic and speed measurements are required. The methodology is based on the equivalent circuit method, whose parameter values are determined through the use of genetic algorithms. Initially, the values of the classical equivalent circuit of the induction motor are determined based on catalog data provided by the manufacturer. Heuristic relationships are applied along with the circuit equations in order to limit the search space to feasible solutions. Later, the parameter values are adjusted using measurements obtained during normal operation in the field, and the efficiency is calculated with the new values. An alternative model is employed in order to consider the variation of mechanical and stray-load losses. The methodology was tested on motors of different power ratings, and the results were compared with standard methods of motor efficiency determination through bench tests.

Keywords: Three-phase induction motor. Efficiency. Genetic Algorithms. Equivalent circuit.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fluxo das potências em um MIT	31
Figura 2.2 - Circuito equivalente do motor de indução	35
Figura 3.1 - População de cromossomos representados na forma binária	48
Figura 3.2 - Fluxograma de um algoritmo genético	50
Figura 3.3 - Representação de um indivíduo com 5 características e 4 pontos de corte para o cruzamento	51
Figura 4.1 - Diagrama simplificado da metodologia para a determinação do rendimento de MITs	60
Figura 4.2 - Circuito equivalente do motor de indução	61
Figura 4.3 - Circuito equivalente do MIT com representação de perdas mecânicas e suplementares	63
Figura 4.4 - Decomposição da resistência variável para representar a potência útil, perdas suplementares e perdas mecânicas	64
Figura 4.5 - Modelo proposto na metodologia para os resultados de campo	65
Figura 4.6 - Algoritmo para determinar os valores iniciais para os parâmetros do motor	73
Figura 4.7 - Diagrama representando a etapa de campo da metodologia	81
Figura 5.1 - Valores rRMSE dos melhores conjunto de parâmetros obtidos a partir de dados de catálogo (com e sem a utilização de heurística de perdas)	91
Figura 5.2 - Distribuição percentual das perdas nos modelos dos motores analisados (com e sem a utilização da heurística de perdas)	92
Figura 5.3 - Rendimento experimental e calculado com o modelo ajustado para o motor A	99
Figura 5.4 - Rendimento experimental e calculado com o modelo ajustado para o motor B	99
Figura 5.5 - Rendimento experimental e calculado com o modelo ajustado para o motor C	100
Figura 5.6 - Rendimento experimental e calculado com o modelo ajustado para o motor D	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Influência de cada perda na perda total do MIT	32
Tabela 2.2 - Valores assumidos da perda suplementar nas normas IEEE 112 e NBR 5383	35
Tabela 4.1 - Relações entre os parâmetros X1 e X2 segundo a norma IEEE 112	69
Tabela 4.2 - Influência de cada perda na perda total	69
Tabela 5.1 - Dados de catálogo dos motores utilizados na aplicação da metodologia proposta	84
Tabela 5.2 - Valores dos desvios do vetor θ e o rRMSE calculado para os modelos dos motores analisados (sem heurística de perdas)	85
Tabela 5.3 - Valores dos parâmetros obtidos para o modelo com melhor rRMSE dos motores analisados (sem heurística de perdas)	87
Tabela 5.4 - Distribuição percentual das perdas calculadas com os modelos de melhor rRMSE dos motores analisados (sem heurística de perdas)	87
Tabela 5.5 - Valores dos desvios do vetor θ e o rRMSE calculado para os modelos dos motores analisados (com heurística de perdas)	89
Tabela 5.6- Distribuição percentual das perdas calculadas com os modelos de melhor rRMSE dos motores analisados (com heurística de perdas)	91
Tabela 5.7 - Dados de catálogo dos motores com resultados experimentais ensaiados na empresa WEG	93
Tabela 5.8 - Dados experimentais de motores ensaiados na empresa WEG	93
Tabela 5.9 - Parâmetros de referência para os motores ensaiados na empresa WEG	93
Tabela 5.10 - Valores dos desvios do vetor θ e o rRMSE calculado para os modelos dos motores fornecidos pela WEG	95
Tabela 5.11 - Valores dos desvios do vetor β e o rRMSE calculado para os modelos dos motores fornecidos pela WEG	95
Tabela 5.12 - Dados de catálogo do 4º motor usado (motor antigo) na validação da metodologia proposta	97
Tabela 5.13 - Valores dos parâmetros dos modelos obtidos dos dados de catálogos dos motores utilizados na validação da metodologia	97
Tabela 5.14 - Valores das medidas experimentais realizadas nos motores utilizados na validação da metodologia	97
Tabela 5.15 - Diferença de rendimento medido e calculado pelo modelo ajustado	98
Tabela 5.16: Diferença de rendimento medido e calculado pelo modelo ajustado considerando dois pontos de medição	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
AG – Algoritmos Genéticos.
CEPEL – Centro de Pesquisas em Energia Elétrica.
ESCO – *Energy Saving Company*.
IEC – *International Electrotechnical Commission*.
IEEE – *Institute of Electrical and Electronic Engineers*.
JEC – *Japanese Electrotechnical Commitee*.
MIT – Motor de Indução Trifásico.
MSRF – *Motor Systems Resource Facility*.
NAGT – *Non-intrusive Air-Gap Torque*.
NBR – Norma Brasileira.
NEMA – *National Electrical Manufacturers Association*.
OHM – *Ontario Hydro Modified*.
ORNL – *Oak Ridge National Laboratory*.
PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica.
rRMSE – *relative Root Mean Squared Error*.
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina.

LISTA DE SÍMBOLOS

η – Rendimento	[%]
$P_{saída}$ – Potência mecânica de saída	[W]
$P_{entrada}$ – Potência elétrica de entrada	[W]
P_j – Perdas por efeito joule	[W]
P_{j1} – Perdas por efeito joule no estator	[W]
P_{j2} – Perdas por efeito joule no rotor	[W]
P_{fe} – Perdas no ferro	[W]
P_{rot} – Perdas rotacionais (atrito e ventilação)	[W]
P_{sup} – Perdas suplementares	[W]
P_n – Potência nominal	[W]
$\overline{V_f}$ – Tensão de fase	[V]
$\overline{E_1}$ – Tensão no ramo magnetizante do modelo	[V]
$\overline{I_1}$ – Corrente de fase no estator	[A]
$\overline{I_0}$ – Corrente no ramo magnetizante do modelo	[A]
$\overline{I_2}$ – Corrente do rotor referida ao estator	[A]
$\overline{I_f}$ – Corrente que circula em R_f	[A]
$\overline{I_m}$ – Corrente que circula em X_m	[A]
R_1 – Resistência do enrolamento do estator	[Ω]
X_1 – Reatância de dispersão do enrolamento do estator	[Ω]
R_2 – Resistência do enrolamento do rotor	[Ω]
X_2 – Reatância de dispersão do enrolamento do rotor	[Ω]
R_f – Resistência elétrica determinada em função das perdas no circuito magnético do motor	[Ω]
X_m – Reatância de magnetização do motor	[Ω]
s – escorregamento do motor	[adimensional]
η_n – Rendimento nominal	[%]
s_n – Escorregamento nominal	[adimensional]
I – Corrente de entrada no ponto de operação	[A]
I_n – Corrente de entrada no ponto de operação	[A]
P_{ent} – Potência elétrica de entrada	[W]
P_{entn} – Potência elétrica de entrada nominal	[W]
V – Tensão de alimentação do motor	[V]
V_n – Tensão nominal de alimentação do motor	[V]
P_{sai} – Potência mecânica de saída	[W]
T_{eixo} – Torque no eixo do motor (Conjugado)	[kgfm]
ω_r – Velocidade angular do rotor	[rad/s]

P_{ag} – Potência no entreferro	[W]
T_{ag} – Torque no entreferro (Conjugado)	[kgfm]
ω_s – Velocidade síncrona do rotor	[rad/s]
p – Número de pólos do motor	[adimensional]
i_a – Correntes de linha na fase “A” do motor	[A]
i_b – Correntes de linha na fase “B” do motor	[A]
i_c – Correntes de linha na fase “C” do motor	[A]
V_{ab} – Tensão de linha entre as fases “A” e “B” do motor	[V]
V_{ca} – Tensão de linha entre as fases “C” e “A” do motor	[V]
R_{carga} – Resistência elétrica que representa no modelo do motor a potência entregue a carga	[Ω]
R_{sup} – Resistência elétrica que representa no modelo do motor as perdas suplementares	[Ω]
V_l – Tensão de linha de alimentação do motor	[V]
n – Rotação do motor	[rpm]
I_p/I_n – Corrente de partida referenciada à corrente nominal	[adimensional]
C_n – Conjugado nominal	[kgfm]
C_p/C_n – Conjugado de partida referenciado ao conjugado nominal	[adimensional]
C_m/C_n – Conjugado máximo referenciado ao conjugado nominal	[adimensional]
η_{100} – Rendimento nominal	[%]
η_{75} – Rendimento com motor operando a 75 % da potência nominal	[%]
η_{50} – Rendimento com motor operando a 50 % da potência nominal	[%]
fp_{100} – fator de potência nominal	[adimensional]
$\cos\phi_{100}$ – fator de potência nominal	[adimensional]
fp_{75} – fator de potência com motor operando a 75 % da potência nominal	[adimensional]
$\cos\phi_{75}$ – fator de potência com motor operando a 75 % da potência nominal	[adimensional]
fp_{50} – fator de potência com motor operando a 50 % da potência nominal	[adimensional]
$\cos\phi_{50}$ – fator de potência com motor operando a 50 % da potência nominal	[adimensional]
P_{ent75} – Potência elétrica de entrada com motor operando a 75 % da potência nominal	[W]

P_{ent50} – Potência elétrica de entrada com motor operando a 50 % da potência nominal	[W]
P_{sai75} – Potência de saída com motor operando a 75 % da potência nominal	[W]
P_{sai50} – Potência de saída com motor operando a 50 % da potência nominal	[W]
P_{sup75} – Perdas suplementares com motor operando a 75 % da potência nominal	[W]
P_{sup50} – Perdas suplementares com motor operando a 50 % da potência nominal	[W]
I_{175} – Corrente no estator do motor operando a 75 % da potência nominal	[A]
I_{150} – Corrente no estator do motor operando a 50 % da potência nominal	[A]
s_{75} – escorregamento do motor operando a 75 % da potência nominal	[adimensional]
s_{50} – escorregamento do motor operando a 50 % da potência nominal	[adimensional]
T_{75} – Conjugado de saída com o motor operando a 75 % da potência nominal	[kgfm]
T_{50} – Conjugado de saída com o motor operando a 50 % da potência nominal	[kgfm]
Q_{in} – Potência reativa de entrada	[W]
P_{j1min} – Valor mínimo das perdas por efeito joule no estator	[W]
P_{j1max} – Valor máximo das perdas por efeito joule no estator	[W]
P_{j2min} – Valor mínimo das perdas por efeito joule no rotor	[W]
P_{j2max} – Valor máximo das perdas por efeito joule no rotor	[W]
P_{femin} – Valor mínimo das perdas no ferro	[W]
P_{femax} – Valor máximo das perdas no ferro	[W]
P_{rotmin} – Valor mínimo das perdas rotacionais	[W]
P_{rotmax} – Valor máximo das perdas rotacionais	[W]
P_{rot75} – Valor das perdas rotacionais com motor operando a 75 % da potência nominal	[W]
P_{rot50} – Valor das perdas rotacionais com motor operando a 50 % da potência nominal	[W]

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	15
LISTA DE SÍMBOLOS	17
SUMÁRIO	21
1. INTRODUÇÃO.....	25
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO	26
1.2 ESTRUTURA DE APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	27
2. DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DE MITs.....	29
2.1 DEFINIÇÃO DO RENDIMENTO DE MITs	29
2.2 DESCRIÇÃO DAS PERDAS EM MITs	29
2.2.1 Perdas por Efeito Joule (P_j).....	29
2.2.2 Perdas no Ferro (P_{fe}).....	29
2.2.3 Perdas por Atrito e Ventilação (Perdas Rotacionais - P_{rot}).....	30
2.2.4 Perdas Suplementares (P_{sup})	30
2.2.5 Classificação das Perdas e Fluxo de Potência no MIT	30
2.3 NORMAS SOBRE RENDIMENTO DE MITs	32
2.4 METODOS DE DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DE MITS SEGUNDO A NORMA IEEE112 E NBR5383.....	33
2.5 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DE MITS EM OPERAÇÃO	37
2.5.1 Métodos Baseados nos Dados de Placa.....	38
2.5.2 Métodos do Escorregamento, da Corrente de Entrada e da Potência de Entrada.....	39
2.5.3 Método das Perdas Segregadas.....	40
2.5.4 Métodos do Circuito Equivalente	41
2.5.5 Método do Torque no Entreferro	42

2.6	EQUIPAMENTOS E PROGRAMAS PARA A DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DE MITs	43
3.	ALGORITMOS GENÉTICOS.....	47
3.1	TEORIA GERAL DOS ALGORITMOS GENÉTICOS	47
3.1.1	Formas de Codificação	48
3.1.2	Descrição do Algoritmo	49
3.1.3	O Processo de Seleção.....	50
3.1.4	O Cruzamento	51
3.1.5	Mutação	52
3.1.6	Elitismo	53
3.1.7	Elementos Estocásticos Associados aos Algoritmos Genéticos	53
3.2	ALGORITMOS GENÉTICOS NA DETERMINAÇÃO DOS VALORES DOS PARÂMETROS DO MODELO DO MIT.....	54
3.3	CARACTERISTICAS DO ALGORITMO GENÉTICO UTILIZADO NA METODOLOGIA	56
4.	A METODOLOGIA PROPOSTA PARA A DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DO MIT EM CAMPO	59
4.1	EQUACIONAMENTO DOS MODELOS DO MIT	61
4.2	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DO MIT A PARTIR DE DADOS DE CATÁLOGO	67
4.2.1	Dados de placa fornecidos pelos fabricantes	67
4.2.2	A Formulação do Problema	68
4.2.3	Descrição da Metodologia Proposta para a Determinação dos Valores dos Parâmetros do MIT a partir de Dados de Catálogo.....	70
	Determinação da 1ª aproximação para os parâmetros do motor	71
	2ª Etapa da obtenção dos valores dos parâmetros do modelo a partir dos dados de catálogo	74
4.3	DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DO MIT EM CAMPO.....	78

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	83
5.1 DETERMINAÇÃO DOS VALORES DOS PARÂMETROS DO MODELO DO MIT A PARTIR DE DADOS DE CATÁLOGOS	83
5.2 UMA MEDIDA DA QUALIDADE DOS VALORES DOS PARÂMETROS DO MODELO DO MIT OBTIDOS A PARTIR DOS DADOS DE CATÁLOGO.....	92
5.3 AJUSTANDO O MODELO PARA MEDIDAS EM CAMPO E A DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DO MOTOR NO SEU PONTO DE OPERAÇÃO	96
5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	102
6. CONCLUSÃO.....	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

1. INTRODUÇÃO

Desde a criação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) em 1985, tem-se observado um crescente interesse em programas de eficiência energética, principalmente após o evento do colapso no sistema de geração/transmissão/fornecimento de energia elétrica (“apagão”) de 2001, que culminou num racionamento de energia. Na indústria, um dos maiores potenciais de melhoria de eficiência energética está relacionado a sistemas motrizes, constituídos, em sua maioria, por motores de indução trifásicos (MITs).

Um bom potencial de conservação de energia em motores de indução trifásicos está na utilização de motores do tipo de alto rendimento em substituição a motores convencionais. Entretanto, este potencial de economia de energia está sujeito à análise do retorno financeiro desta troca. Dada a impossibilidade de se determinar o rendimento real de um motor em uso (em campo), as empresas que operam na área de eficiência energética, as *Energy Saving Company* (ESCOs), estimam um possível ganho de eficiência energética utilizando valores nominais de rendimento de motores fornecidos nas folhas de dados de fabricantes. Na prática, o rendimento de um motor novo é comparado com o valor nominal do rendimento do motor em uso. No máximo, são realizadas medidas do carregamento do motor estimando-se o rendimento através de interpolação na curva de rendimento fornecida pelo fabricante. Da análise econômica desta comparação, opta-se ou não pela substituição do motor em uso. A maior dificuldade desta análise é que com a comparação dos rendimentos nominais do motor em uso e do motor novo, os resultados, embora representem ganhos energéticos, podem significar retornos financeiros que não justifiquem o investimento na aquisição de motores novos de alta eficiência. Além disto, são excluídos desta comparação os motores em uso que já são de alto rendimento. Entretanto, alguns destes podem estar com o seu desempenho energético comprometido em função do mau uso, danos na parte ativa (enrolamentos, núcleos, mancais, ...) e de problemas com manutenção em geral.

Para dar suporte técnico à proposta de substituição de motores e garantir a sua viabilidade econômica é importante conhecer a perda de rendimento que o motor sofreu ao longo dos anos de utilização. Assim, torna-se necessário o desenvolvimento de métodos de medição, experimentação e levantamento de grandezas para a determinação do rendimento de um motor de indução sem retirá-lo de operação. Pois, além de ser um procedimento oneroso, geralmente os operadores de uma planta industrial são extremamente contrários à ideia de parar uma linha de

produção para realização de testes. Mesmo em momentos de parada programada da linha de produção a prioridade é dada aos trabalhos de manutenção corretiva e preventiva, sendo as equipes técnicas deslocadas para estas funções, onde a realização de testes de rendimento de motores é relevada a um segundo plano.

O processo de modelagem de motores de indução geralmente é destinado à análise, concepção e projeto. Por outro lado, na comunidade científica, está crescendo a motivação para a utilização de modelos para a determinação da eficiência energética de motores de indução. Existem vários trabalhos publicados com metodologias de busca ou determinação de valores dos parâmetros de modelos de motores com este enfoque [1-4]. A maioria destes trabalhos, embora não ignorem os problemas relacionados ao processo de medição de motores em campo, não os consideram totalmente nas soluções propostas, pois ainda se utilizam de uma ou outra medida intrusiva, como por exemplo, o desacoplamento do motor da alimentação para a medição da resistência dos enrolamentos. A originalidade do trabalho proposto está na mudança de enfoque em relação ao objetivo da modelagem do motor de indução, voltando-se exclusivamente para a determinação do rendimento de motores dentro da perspectiva da eficiência energética.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral desta tese é desenvolver uma metodologia para a determinação do rendimento de motores em operação considerando a realização apenas de medidas de grandezas elétricas e magnéticas, sem a necessidade de parar o processo em que o mesmo está inserido ou alterar o seu ponto de funcionamento. Com esta metodologia pretende-se oferecer aos profissionais que trabalham com eficiência energética uma ferramenta para qualificar técnica e financeiramente as propostas de substituição de motores instalados na indústria por motores novos de maior rendimento.

Os objetivos específicos do doutoramento foram: a) Realizar o estudo das técnicas experimentais normatizadas de ensaios de motores de indução e do estado da arte nas propostas alternativas de determinação do rendimento de motores. b) Propor metodologia para a determinação do rendimento de motores em campo sem interromper a operação do motor. c) Implementar a metodologia proposta; d) Testar a metodologia proposta por simulação e com dados experimentais.

1.2 ESTRUTURA DE APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Dentro do contexto apresentado neste capítulo introdutório e seguindo os objetivos anteriormente descritos, no Capítulo 2 são apresentados os conceitos básicos relacionados à determinação do rendimento de MITs. São descritas as principais normas utilizadas no cenário mundial e a norma nacional, apresentando-se uma visão geral dos diferentes métodos oficiais existentes. No mesmo capítulo também são apresentadas as principais abordagens encontradas na literatura como alternativas à aplicação dos ensaios previstos em normas, objetivando-se a estimação do rendimento do motor no seu local de operação.

Dentre as abordagens alternativas que serão apresentadas foi feita a opção pelo método do circuito equivalente considerando a estimação dos seus parâmetros através de algoritmos genéticos. O capítulo 3 apresenta uma descrição dos principais conceitos relacionados a algoritmos genéticos.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia proposta na aplicação de algoritmos genéticos para a obtenção de parâmetros do circuito equivalente de MITs a partir de dados fornecidos pelos fabricantes. Inicialmente é apresentada a teoria que permite restringir a área de busca inicial para os parâmetros mais significativos do motor. Embora não seja um método exato, a aplicação desta análise contribui significativamente para a convergência dos resultados, sendo descritos os passos das diversas iterações envolvidas no processo de determinação dos parâmetros dos modelos de motores de diferentes potências e número de polos.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos com a metodologia, em três situações distintas: Obtenção dos valores dos parâmetros do modelo do MIT baseando-se em dados de catálogos de um fabricante; análise da qualidade dos valores dos parâmetros obtidos a partir de dados de catálogo em comparação com os valores obtidos por procedimentos experimentais normatizados; em relação a etapa de campo, a metodologia foi utilizada para calcular o rendimento de motores, sendo os resultados comparados com dados experimentais.

Por fim, discute-se no Capítulo 6 os resultados obtidos, as contribuições mais importantes da tese e propõe-se ações para a continuidade dos trabalhos.

2. DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DE MITs

2.1 DEFINIÇÃO DO RENDIMENTO DE MITs

Por definição o rendimento de motores de indução é a razão entre a potência mecânica de saída e a potência elétrica ativa de entrada, expressa em percentagem [5]. A potência de saída pode ser obtida pela potência de entrada menos as perdas ou, conseqüentemente, a potência de entrada corresponde aos valores de potência de saída mais as perdas, o que é sintetizado na Equação (2.1).

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = \frac{(P_{entrada} - Perdas)}{P_{entrada}} = \frac{P_{saída}}{(P_{saída} + Perdas)} \quad (2.1)$$

2.2 DESCRIÇÃO DAS PERDAS EM MITs

São cinco os tipos de perdas que ocorrem em máquinas de indução: perdas por efeito joule no estator, perdas por efeito joule no rotor, perdas no núcleo de ferro, perdas por atrito e ventilação (perdas mecânicas) e perdas suplementares.

2.2.1 Perdas por Efeito Joule (P_j)

As perdas por efeito joule são as perdas que geram aquecimento dos enrolamentos do estator (P_{j1}) e do rotor (P_{j2}) do motor de indução. Para motores com rotor em gaiola, as perdas joule no rotor ocorrem nas barras que o constituem. Também denominadas por perdas “ I^2R ” elas dependem diretamente do quadrado da corrente e da resistência dos enrolamentos. Sendo assim, variam com o carregamento do motor e a temperatura dos enrolamentos.

2.2.2 Perdas no Ferro (P_{fe})

As perdas no ferro ocorrem devido à histerese magnética e às correntes parasitas (correntes de Foucault) que surgem nos núcleos do motor. As perdas por correntes parasitas são perdas joule causadas por

correntes induzidas no núcleo magnético. Já as perdas por histerese acontecem devido à energia gasta para deslocar as paredes dos domínios magnéticos no ferro em função da variação da magnetização. Elas dependem da qualidade do material utilizado, dos níveis de indução, das frequências envolvidas e de aspectos construtivos do motor [6-7]. Apesar de sofrerem influência da corrente no rotor, a qual varia com o carregamento, as perdas no núcleo são consideradas constantes e são determinadas a partir de ensaios com o motor em vazio [6-7].

2.2.3 Perdas por Atrito e Ventilação (Perdas Rotacionais - P_{rot})

As perdas por atrito e ventilação são perdas mecânicas devido ao atrito nos mancais e ao sistema de ventilação do motor. Podem ser consideradas constantes em motores com baixo valor de escorregamento, ou seja, que não sofrem grande variação de velocidade quando operando em vazio ou plenamente carregados. Também são determinadas a partir de ensaios com o motor em vazio.

2.2.4 Perdas Suplementares (P_{sup})

As perdas suplementares são perdas adicionais no ferro devido às imperfeições construtivas da máquina e a fluxos dispersos. Possuem componentes de frequência fundamental e de alta frequência. Representam as perdas no ferro devido a fluxos dispersos e ao efeito pelicular nos enrolamentos do estator e nas barras do rotor. As perdas suplementares são as mais difíceis de serem medidas em laboratório, sendo definidas por exclusão como aquelas não contempladas nas demais perdas dos motores. Normalmente são obtidas a partir das perdas totais, quando conhecidas, subtraindo-se as demais perdas, ou através de percentuais da potência nominal do motor definidos em normas. É um tipo de perda que depende do carregamento do motor.

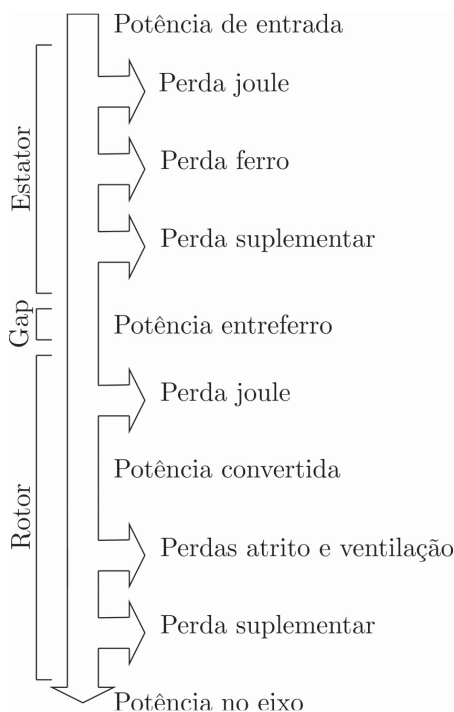
2.2.5 Classificação das Perdas e Fluxo de Potência no MIT

As perdas nos motores de indução podem ser classificadas em: perdas fixas ou constantes, que independem do carregamento do motor; e perdas variáveis. As perdas no núcleo do motor e por atrito e ventilação (também

chamadas de perdas rotacionais) são consideradas geralmente constantes [7], e as perdas joule e suplementares variáveis.

Uma análise a ser considerada quando se trata do estudo das perdas em um MIT é a do fluxo de potência apresentado na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Fluxo das potências em um MIT.



Na Figura 2.1 se observa que as perdas joule e suplementares ocorrem tanto no estator quanto no rotor. No entanto, nas aplicações práticas, a perda suplementar é considerada concentrada, sendo medido ou estimado o seu valor total. A potência no entreferro corresponde à potência transferida do estator para o rotor, e é obtida pela potência de entrada diminuída das perdas no circuito do estator e no núcleo. A potência no entreferro diminuída da potência Joule no rotor é denominada por potência convertida.

A Tabela 2.1 apresenta um demonstrativo médio da composição das perdas individuais no total das perdas [8], para o motor operando a plena carga.

Tabela 2.1: Influência de cada perda na perda total do MIT.

Perdas	Participação na Perda Total (%)
P_{j1} (estator)	25 – 40
P_{j2} (rotor)	15 – 25
P_{rot} (atrito e ventilação)	5 – 15
P_{fe} (ferro)	15 – 25
P_{sup} (suplementares)	10 – 20

2.3 NORMAS SOBRE RENDIMENTO DE MITs

As principais normas sobre rendimento de motores adotadas internacionalmente são:

- IEEE 112 – “Test Procedures for Polyphase Motors and Generators” do “Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)”;
- IEC 60034-2-1 – “Methods for Determining Losses and Efficiency of Rotating Electrical Machines from Tests” elaborada pelo “International Electrotechnical Commission (IEC)” e
- JEC-37 – “Induction Machine” elaborada por “Japanese Electrotechnical Committee (JEC)”.

A norma IEEE 112 é a referência das normas NEMA MG-1 e NBR 5383, utilizadas respectivamente nos EUA e no Brasil. Sua primeira versão foi publicada em 1964 com revisões em 1991, 1996 e 2004. Contém diversos métodos para a determinação da eficiência de motores e geradores, destacando-se o método B (a ser visto adiante), considerado o mais preciso.

Na maioria dos países da comunidade europeia é adotada a norma IEC 60034-2-1 criada em 2007, substituindo a antiga norma IEC 34-2 publicada em 1972 e com revisões em 1995-1996. A principal mudança da norma IEC 60034-2-1 em relação à IEC 34-2 ocorreu na forma de calcular as perdas suplementares [9]. Na norma anterior era arbitrado o valor de 0,5 % da potência nominal de saída como perda suplementar para todos os motores, o que resultava num valor de rendimento final do motor com uma diferença significativa em relação ao obtido pela norma americana IEEE 112. Na nova norma, o percentual da potência nominal atribuído à perda suplementar varia de 0,5 % até 2,5 % dependendo da potência do motor.

JEC-37 é o padrão de testes elaborado pelo “*Japanese Electrotechnical Committee*” e adotado como referência, principalmente no Japão. A JEC-37 também especifica os métodos básicos da IEEE-112, com exceção do método C (método da máquina dupla). O método preferido pela norma é o do diagrama circular, que consiste na obtenção de todas as características operativas dos motores de indução através de simples relações lineares e trigonométricas a partir dos dados obtidos através de dois ensaios: ensaio de rotor livre (em vazio) e ensaio de rotor bloqueado [10]. Este método não considera as perdas suplementares, resultando em valores de rendimentos de motores maiores do que aqueles obtidos pelas outras normas.

No Brasil é adotada a norma NBR 5383 – “Máquinas elétricas girantes Parte 1: Motores de indução trifásicos – Ensaio” – Elaborada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e que segue a IEEE 112.

Numa comparação entre os padrões IEEE 112, IEC 34-2-1 e JEC-37, o padrão IEEE 112 apresentou-se como o conjunto mais completo e preciso de testes aplicáveis a todos os tipos e tamanhos de motores de indução. Uma das vantagens deste método é considerar correções em função da temperatura ambiente e do ponto de operação da máquina para os valores medidos de parâmetros [11-12]. Na próxima seção será feita uma breve descrição dos métodos especificados na norma IEEE 112 e NBR 5383.

2.4 METODOS DE DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DE MITS SEGUNDO A NORMA IEEE112 E NBR5383

Os métodos indicados nas normas IEEE 112 e NBR 5383, os quais encontram equivalência nas demais normas internacionais, são apresentados a seguir.

Método A (IEEE) / Método 1 (NBR) - Medição direta da potência de entrada e de saída utilizando freios ou dinamômetros. É o método recomendado para motores de potência até 1 cv. Apresenta versões similares na norma europeia (IEC) e japonesa (JEC), sendo que somente a norma IEEE 112 aplica a correção de temperatura no método. O motor é posto em carga por meio de um freio mecânico ou um dinamômetro. Leituras da potência elétrica, corrente, tensão, frequência, escorregamento, conjugado, temperatura ambiente e temperatura do enrolamento do estator, ou da sua resistência, devem ser obtidas para quatro pontos de carga, aproximadamente em 25 %, 50 %, 75 % e 100 %

da carga nominal, e dois pontos de carga adequadamente escolhidos acima de 100 %, mas não excedendo 150 % da carga nominal [5]. A metodologia de cálculo do desempenho é aplicada através de um formulário de cálculo que contempla a correção do dinamômetro, se aplicável, e a correção da perda joule do estator para a temperatura de operação do motor.

Método B (IEEE) / Método 2 (NBR) - É considerado o principal método da norma IEEE 112 e é referência na comparação com os demais órgãos normativos. É recomendado para motores de até 250 cv, podendo também ser utilizada para motores de maior porte quando houver instalações e equipamentos disponíveis. Neste método, se mede as potências de entrada, de saída (dinamômetro) e as perdas que compõem o conjunto de perdas do motor, com exceção das perdas suplementares.

As perdas suplementares são obtidas da diferença entre as perdas totais e a soma das demais perdas em diferentes pontos de carga. Com estes valores, é realizada uma regressão linear, obtendo-se a equação da reta que define um valor corrigido para as perdas suplementares. Este valor corrigido é utilizado para o cálculo de uma nova potência de saída e rendimento. A versão deste método na norma brasileira considera uma opção que não realiza a medição da temperatura do enrolamento, sendo a mesma determinada pela variação da sua resistência entre os pontos de repouso e em plena carga.

Método C (IEEE) / Método 3 (NBR) - Método das máquinas duplicadas com separação das perdas e medição indireta das perdas suplementares. Pode ser utilizado em máquinas de grande porte quando se tem disponíveis duas máquinas idênticas, uma para operar como motor e outra como gerador. Apesar de somente realizar medidas elétricas, o que é mais preciso do que utilizar um dinamômetro, é pouco usual, pois além da necessidade das duas máquinas idênticas, requer um conjunto duplo de fontes de alimentação, com uma delas operando com frequência variável. Ele é também chamado de teste “Back-to-Back” pelo fato da potência tirada da linha ser devolvida para o mesmo sistema [8].

Método E (IEEE) / Método 4 (NBR) - Neste método não existe medição da potência de saída, que é determinada a partir da potência de entrada, subtraindo-se o total das perdas. A sua singularidade é a medição direta das perdas suplementares num procedimento não trivial que envolve parcelas devido à frequência fundamental e às altas frequências. Para a determinação da parcela correspondente à frequência fundamental é realizado um ensaio com a aplicação de tensão polifásica equilibrada nos terminais do enrolamento do estator com o rotor removido. A perda suplementar que ocorre devido às altas frequências é determinada por um

ensaio de rotação reversa, onde um motor completamente montado e submetido a uma tensão polifásica equilibrada na frequência nominal tem o rotor acionado por meio externo à velocidade síncrona no sentido oposto à rotação do campo do estator.

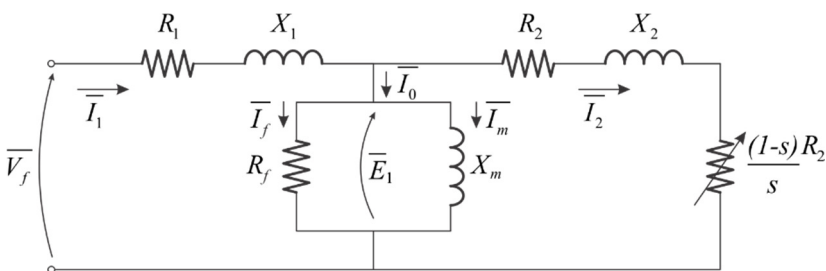
Método EI (IEEE) / Método 5 (NBR) - É uma simplificação do método anterior onde não é necessário medir as perdas suplementares. O valor das perdas suplementares é assumido como um percentual da potência de saída. O valor do percentual varia para diferentes faixas de potência segundo a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Valores assumidos da perda suplementar nas normas IEEE 112 e NBR 5383

P_n (cv)	$P_{sup}/P_n(\%)$
1 - 125	1,8
126 - 500	1,5
501 - 2499	1,2
Acima de 2500	0,9

Método F (IEEE) / Método 6 (NBR) - Circuito equivalente com medição direta das perdas suplementares. Neste método, utiliza-se um modelo elétrico equivalente do motor, apresentado na Figura 2.2, para se determinar as suas características operacionais, entre elas o rendimento.

Figura 2.2 - Circuito equivalente do motor de indução.



Na Figura 2.2, são definidos:

- \overline{V}_f é a tensão de fase;
- \overline{E}_1 é a tensão no ramo magnetizante do modelo;
- \overline{I}_1 é a corrente de fase no estator;
- \overline{I}_0 é a corrente no ramo magnetizante do modelo;

- $\overline{I_2}$ é a corrente do rotor referida ao estator;
- $\overline{I_f}$ é a corrente que circula em R_f ;
- $\overline{I_m}$ é a corrente que circula em X_m ;
- R_1 é a resistência do enrolamento do estator;
- X_1 é a reatância de dispersão do enrolamento do estator;
- R_2 é a resistência do enrolamento do rotor;
- X_2 é a reatância de dispersão do enrolamento do rotor;
- R_f é a resistência elétrica determinada em função das perdas no circuito magnético do motor;
- X_m é a reatância de magnetização do motor;
- s é o escorregamento do motor.

Para determinar os parâmetros do modelo são realizados testes em vazio e de impedância. No modelo não estão representadas as perdas mecânicas e suplementares, que também devem ser medidas. Este método é similar ao método do diagrama circular da norma JEC-37, com exceção de que desconsidera as perdas suplementares.

Método F1 (IEEE) / Método 7 (NBR) - Método do circuito equivalente com valor assumido para as perdas suplementares. É idêntico ao método anterior, com exceção que as perdas suplementares são assumidas segundo os percentuais apresentados na Tabela 2.2.

Os demais métodos previstos nas duas normas são:

- Método C/F (IEEE) / Método 8 (NBR) - Método do Circuito equivalente calibrado por um ponto de carga do método das máquinas duplicadas;
- Método E/F (IEEE) / Método 9 (NBR) - Método do Circuito equivalente calibrado por um ponto de carga do método E (método 4) e
- Método EI/F1 (IEEE) / Método 10 (NBR) - Método do Circuito equivalente calibrado por um ponto de carga do método EI (método 5).

Nestes métodos, o circuito equivalente em conjunto com um ponto de carga obtido por outro método pode ser utilizado para determinar as características do motor em outros pontos de carga.

2.5 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DE MOTORES EM OPERAÇÃO

A determinação do rendimento de um motor de indução segundo procedimentos estabelecidos em normas, independentemente do método utilizado, requer diversos testes que só podem ser realizados em laboratórios devidamente instrumentados. Para um motor que está em operação na indústria, a determinação do seu rendimento requer que o mesmo seja retirado do seu local de funcionamento para ser levado ao laboratório, sendo necessária a utilização de motores reservas. Além disto, tem-se que considerar o custo da parada de produção e dos ensaios e o deslocamento do motor até o laboratório onde serão realizados os testes, normalmente em empresa especializada. Todos estes aspectos contribuem para que testes em motores e a determinação precisa do seu rendimento somente sejam realizados quando o mesmo for novo, e na própria fábrica, seja por amostragem, no caso dos motores de linha de produção, ou na fase de aceitação de uma compra, quando se tratar de motores de grande porte ou de projetos especiais.

Neste contexto, normalmente procedimentos de eficiência energética se limitam a determinar o carregamento do motor, e utilizando curvas de rendimento obtidas em dados de fabricantes, estimam o seu rendimento comparando-o com o rendimento de um motor novo para o mesmo ponto de operação. Neste procedimento são desconsideradas as perdas de rendimento que o motor apresenta com o tempo de uso, decorrentes do ambiente de instalação, condições de manutenção, sobrecargas e eventuais faltas incipientes.

Para determinar o rendimento de um motor em operação foram desenvolvidos diversos métodos alternativos aos métodos normatizados. Entre as principais características destes métodos a serem consideradas na sua categorização estão: o seu nível de intrusão no processo, os tipos de dados e as medições necessárias, e a precisão dos mesmos quando comparados com os métodos tradicionais previstos em normas.

O grau de intrusão de um método de estimação do rendimento em campo é determinado pelo tipo de dados e medições requeridas e pela dificuldade de se realizar estas medições [13]. Dependendo do método utilizado, as seguintes informações podem ser requeridas:

a. Leitura de dados de placa - É um dado relativamente simples de ser obtido, a não ser quando o acesso físico ao motor é dificultado em função das características físicas da máquina ou do ambiente em que o mesmo está instalado. Nestes casos, uma alternativa é utilizar os registros

que a empresa tem sobre o motor, não sendo necessário qualquer tipo de intervenção na sua operação.

b. Velocidade de rotação do motor - A instalação de um tacômetro para a medição da velocidade do motor exige que o mesmo seja parado. A opção é a utilização de um medidor de velocidade de rotação baseado em efeito estroboscópico. Entretanto, dependendo da dificuldade de se estabelecer um ponto fixo no eixo do motor, pode ser necessária a instalação de adesivos reflexivos de referência de posição com a parada do motor mesmo que por um tempo menor. De qualquer forma, a realização desta medição é um procedimento considerado de baixa intrusão.

c. Medição de tensões, correntes e potências de entrada. Podem ser realizadas no centro de cargas onde o motor está instalado sem que o mesmo precise ser parado. A dificuldade nestes casos se dá com os motores de média tensão devido à maior periculosidade do procedimento ou à necessidade de equipamento de medição com maior capacidade de isolamento. Uma alternativa é realizar as leituras através dos transformadores de tensão e de corrente quando disponíveis. Estes tipos de medições também são considerados procedimentos de baixa intrusão.

d. Leitura da resistência e temperatura do enrolamento do estator. É um procedimento que exige a parada do motor para a instalação de instrumentos sobre os seus contatos e pontos da carcaça, sendo de difícil execução prática.

e. Testes em vazio e de motor travado - São os testes descritos em normas e normalmente realizados em laboratório. São de alto grau de intrusividade.

f. Medição do torque no eixo - Exigem que a carga seja desacoplada para a instalação de dinamômetro, sendo também de alta intrusividade.

Os métodos de estimação do valor da eficiência de um motor em operação estudados neste trabalho [1-2] [14-15], são descritos a seguir:

2.5.1 Métodos Baseados nos Dados de Placa

São os métodos mais simples e de menor precisão. Na sua versão padrão consiste em assumir que a eficiência do motor é constante e igual à definida nos dados de placa para a potência nominal, ou seja, não considera a variação do rendimento com o nível de carregamento do motor. Neste caso nenhuma medição do motor em campo é necessária. Mesmo quando se considera o carregamento, os resultados obtidos a

partir dos dados de placa para os motores comerciais são imprecisos, pois estes dados são obtidos em ensaios realizados por amostragem em lotes de motores. Além disto, dependendo da procedência do motor, a norma adotada nos testes para obtenção dos dados de placa pode ser diferente daquela segundo a qual se deseja estimar o rendimento em operação. Por fim, as condições e o tempo de operação podem levar a valores bastante distintos dos apresentados nos dados de placa ou até o motor pode ter sido recondicionado, alterando-se os valores fornecidos pelos fabricantes.

Apesar de pouco precisos quando aplicados isoladamente, os valores obtidos dos dados de placa podem ser utilizados em conjunto com outras técnicas para melhorar a sua precisão.

2.5.2 Métodos do Escorregamento, da Corrente de Entrada e da Potência de Entrada

São três métodos com o mesmo tipo de abordagem, mas considerando grandezas diferentes. Dependendo do método utilizado, são realizadas medidas da velocidade de rotação do eixo (calculando-se o escorregamento), da corrente de alimentação, ou da potência de entrada do motor. Estes valores são comparados com os dados nominais à plena carga para estabelecer o valor do carregamento do motor. O valor do rendimento do motor no ponto de operação (η) é obtido pela aplicação do carregamento sobre o valor nominal do rendimento, segundo as equações (2.2), (2.3) e (2.4). Em síntese, estes métodos são uma evolução do método dos dados de placa, com a diferença que consideram o carregamento do motor, estando sujeitos aos mesmos problemas descritos na seção anterior.

$$\eta = \frac{s}{s_n} \eta_n \quad (2.2)$$

$$\eta = \frac{I}{I_n} \eta_n \quad (2.3)$$

$$\eta = \frac{P_{ent}}{P_{ent_n}} \eta_n \quad (2.4)$$

onde:

- η é o rendimento do motor no ponto de operação;
- η_n é rendimento nominal;
- s é o escorregamento do motor no ponto de operação;
- s_n é o escorregamento nominal;
- I é a corrente de entrada no ponto de operação;
- I_n é a corrente de entrada nominal;
- P_{ent} é a potência de entrada no ponto de operação;
- P_{entn} é a potência de entrada nominal.

No caso do escorregamento, a primeira dificuldade do método é a medição precisa da velocidade do motor. A faixa dinâmica da velocidade do motor a plena carga e a 50 % de carga pode ser de poucas rotações por minuto (rpm), e a precisão do equipamento de leitura pode comprometer a determinação do rendimento. Além disto, tem-se que a variação do escorregamento é inversamente proporcional ao quadrado da variação da tensão de alimentação. Assim, se não for utilizado o valor exato da tensão de alimentação durante a operação do motor, não se pode utilizar o valor nominal do escorregamento como referência para o cálculo do carregamento [15]. Uma correção para este problema foi proposta no método do escorregamento modificado de Ontario Hydro [1] segundo a equação (2.5).

$$\eta = \left(\frac{V}{V_{nominal}} \right)^2 \left(\frac{s}{s_{nominal}} \right) \eta_{nominal} \quad (2.5)$$

Diversos métodos são propostos na literatura para melhorar o desempenho dos métodos da corrente e do escorregamento [1] [16]. Para o método da corrente também são necessárias correções, pois a curva de corrente em função do carregamento não é exatamente linear. O método que utiliza a potência de entrada como medida do carregamento é o que apresenta melhores resultados, sendo utilizado no programa BDMotor do CEPEL [17].

2.5.3 Método das Perdas Segregadas

São métodos que se concentram na determinação das perdas do motor de indução e por isto, em geral, são bastante intrusivos. O método

clássico de separação das perdas é o Método E da norma IEEE 112 que requer a medição da resistência do estator, testes em vazio e com rotor bloqueado, além dos experimentos para a determinação das perdas suplementares que exigem, entre outros procedimentos, a retirada do rotor. No método E1, as perdas suplementares são estimadas por um percentual. Entretanto o nível de intrusão continua alto devido à determinação das demais perdas. Opções mais simples do método são obtidas pela adoção de dados de placa e de valores estatísticos. O método *Ontario Hydro Modified* (OHM) é uma modificação do método E1 da norma IEEE 112, onde se adotou o valor de 3,5 % da potência nominal para as perdas em vazio, que envolvem as perdas no ferro e por atrito e ventilação [16]. O valor de 3,5 % foi obtido de forma probabilística e o uso do mesmo tem por objetivo evitar a necessidade de desacoplamento do motor da carga em campo. Isto torna o método pouco intrusivo, mas diminui o grau de precisão.

2.5.4 Métodos do Circuito Equivalente

O circuito equivalente por fase do motor de indução operando em regime permanente, com alimentação balanceada e senoidal foi representado na Figura 2.2. Os métodos baseados no circuito equivalente determinam, segundo o seu equacionamento e a partir do conhecimento dos valores dos seus parâmetros, a potência convertida do MIT. Para a determinação da potência de saída e do rendimento, deve-se subtrair da potência convertida as parcelas referentes às perdas mecânicas e às perdas suplementares, as quais não são representadas neste modelo. Alguns métodos fazem uma simplificação desconsiderando a resistência elétrica relativa às perdas no circuito magnético, diminuindo-se o número de variáveis a serem determinadas. Outros propõem novos componentes para o circuito como, por exemplo, a inclusão de uma resistência em série com R_2 representando as perdas suplementares [14].

As variações encontradas para o método do circuito equivalente estão baseadas na maneira como são obtidos os valores dos parâmetros, que uma vez determinados, podem propiciar o cálculo do desempenho do motor para qualquer ponto de carga. O método F da norma IEEE 112 é o método tradicional de obtenção do rendimento pelo circuito equivalente, embora apresente pouca aplicação com motores em operação, por requerer a remoção do rotor e testes de rotação reversa para a determinação das perdas suplementares. No método F1, as perdas suplementares são estimadas, mas ainda são necessários testes em vazio,

com rotor travado e de impedância para a determinação dos valores dos parâmetros do modelo do motor, o que torna a sua aplicação em campo impraticável.

O método “*Nameplate Equivalent Circuit Method*” do laboratório “*Oak Ridge National Laboratory (ORNL)*” [14] se baseia em informações estatísticas e de dados de placa para determinar os valores dos parâmetros do circuito equivalente. Apesar do seu baixo grau de intrusão no processo, seus resultados não são tão precisos [1].

Outro método bastante citado na literatura é o “*Ontario Hydro's Simplified Method FI*” [14] que usa um circuito equivalente modificado, onde a resistência que representa a perda no ferro e a indutância de magnetização estão em série e não em paralelo, como no modelo original [16]. Apesar de mais simples, o método continua invasivo, pois requer testes em vazio e a medição da resistência do estator, o que é impraticável com um motor em operação.

O método do circuito equivalente é onde se concentra a maior parte das pesquisas recentes para a obtenção do rendimento de motores em campo, sendo utilizadas técnicas de algoritmos genéticos e de otimização multiobjetivos, a serem descritas em outras seções deste trabalho. Este trabalho aplica o método do circuito equivalente associado às técnicas de otimização através de algoritmos genéticos para a determinação dos valores dos parâmetros do modelo e do rendimento do motor.

2.5.5 Método do Torque no Entreferro

A potência de saída de um motor de indução é definida como o produto do torque no eixo e com a sua velocidade angular (2.6). Devido à dificuldade de se medir o torque no eixo do motor, considera-se a potência de saída como sendo a potência no entreferro (P_{ag}) diminuída das perdas joule no rotor, perdas mecânicas (rotacionais) e suplementares (2.7), sendo a potência no entreferro calculada através do torque no entreferro e da velocidade síncrona (2.8).

$$P_{sai} = T_{eixo} \omega_r \quad (2.6)$$

$$P_{sai} = P_{ag} - P_{j2} - P_{rot} - P_{sup} \quad (2.7)$$

$$P_{ag} = T_{ag} \omega_s \quad (2.8)$$

O torque no entreferro representa o efeito combinado de todos os fluxos concatenados e das correntes do estator e do rotor, e leva em consideração o desbalanceamento de tensões de alimentação [18].

A equação que descreve o torque no entreferro é apresentada em (2.9).

$$T_{ag} = \frac{p}{2\sqrt{3}} \left\{ (i_a - i_b) \int [V_{ca} - R_1(i_c - i_a)] dt + \right. \\ \left. -(i_c - i_a) \int [V_{ab} - R_1(i_a - i_b)] dt \right\} \quad (2.9)$$

onde:

- i_a , i_b e i_c são correntes de linha;
- V_{ab} e V_{ca} são tensões de linha;
- p é o número de polos do motor.

O método do torque no entreferro para a determinação da eficiência de um motor é considerado preciso [13] e utiliza apenas uma pequena quantidade de valores instantâneos de correntes e de tensões obtidos a partir de um sistema de aquisição/medição. Entretanto, requer também o conhecimento da resistência do estator e das perdas mecânicas e suplementares, as quais exigem procedimentos bastante intrusivos. Para resolver estes problemas, um método não intrusivo do torque no entreferro (*“Non-intrusive Air-Gap Torque – NAGT”*) foi proposto em [19], onde a velocidade do rotor é estimada pela análise das harmônicas da corrente do estator. A resistência do estator é determinada por um método que prevê a injeção de corrente contínua sobre a alimentação normal do motor, e os testes em vazio foram substituídos por dados de placa e estatísticos. Entretanto, o ganho obtido na não intrusividade deste método resulta em perda de precisão [19].

2.6 EQUIPAMENTOS E PROGRAMAS PARA A DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DE MITs

A maior parte dos programas desenvolvidos no escopo de programas de eficiência energética realiza a avaliação da troca de motores do tipo padrão por motores de alto rendimento baseados somente nos dados de placa fornecidos pelos fabricantes, realizando uma medida, por exemplo, da potência de entrada para a determinação do carregamento do motor em relação a seus valores nominais. Nesta abordagem, considera-se que o motor em uso numa planta industrial mantém as mesmas

características que tinha ao sair da linha de produção, sem levar em conta a diminuição de rendimento devido ao uso, às condições de operação (sobrecarga, ambientes agressivos, número de partidas etc.) e às ações de manutenção. Programas como o BDMotor, desenvolvido pelo CEPTEL [17], e Motor Master Plus [20], desenvolvido pelo departamento de energia dos Estados Unidos, utilizam esta metodologia.

Na última década, algumas empresas também desenvolveram ferramentas para determinação da eficiência de motores em campo, agregando estas ferramentas a instrumentos que já dispunham para avaliação de falhas em motores. Em 2005 o *Motor Systems Resource Facility* (MSRF) da Universidade estadual do Oregon (EUA) publicou um estudo sobre os equipamentos de avaliação de motores [21]. Neste estudo foram convidados a participar seis fornecedores de equipamentos: Weyerhaeuser, PdMa, Baker, Framatome, Digital e Reliance. Somente a Weyerhaeuser, a PdMA e Baker disponibilizaram equipamentos para testes. A Weyerhaeuser desenvolveu um equipamento para uso interno em suas plantas industriais, e a PdMA e a Baker trabalham com equipamentos comerciais. Os demais fabricantes dispunham de equipamentos voltados somente ao diagnóstico de falhas em motores e ainda não haviam concluído um módulo para determinação de rendimento, ou utilizavam métodos que eles próprios consideravam muito invasivos para o caso de motores em operação. No cenário atual os principais fornecedores destes equipamentos continuam sendo Baker e PdMA, uma vez que Weyerhaeuser não desenvolveu produto comercial.

O equipamento da Weyerhaeuser utiliza um medidor de potência que disponibiliza dados para uma estimativa de desempenho baseado em técnicas descritas em [3]. Neste método, a potência de entrada é medida e a potência de saída é estimada *a posteriori* através de um algoritmo que requer o valor da corrente do motor em vazio. Se o valor da corrente em vazio não estiver disponível, é utilizado o valor de 30 % da corrente nominal à plena carga.

O equipamento da PdMA foi desenvolvido a partir do instrumento MCE destinado à detecção de defeitos em motores. Foram adicionadas funções para estimativa da potência de saída e de eficiência, dando origem ao equipamento MCE Max. Pouco se sabe sobre o algoritmo de cálculo da eficiência, a não ser que ele requer o fator de potência dado em placa, e faz o cálculo do escorregamento usando o método descrito na seção 2.6. Uma característica observada nos testes realizados com o equipamento [21] é que as eficiências calculadas não sofrem variação com o nível de carregamento do motor, o que não condiz com a realidade.

Explorer é o equipamento da companhia Baker Instruments que tem como principal função a estimação do rendimento de um motor e também faz um diagnóstico de possíveis defeitos. O método utilizado para a determinação do rendimento se baseia no cálculo da potência de saída através da estimação do torque e da velocidade. Requer o conhecimento ou estimação da resistência do estator. A velocidade de rotação do motor é obtida pela análise espectral da corrente de forma similar ao equipamento da PdMA.

A referência [21] apresenta testes realizados com os três equipamentos, utilizando-se motores de 50 hp, 100 hp e 200 hp. As estimações de rendimento resultantes foram comparadas com valores obtidos a partir de ensaios que seguem a norma IEEE 112 [21]. Para carregamentos entre 50 % e 120 %, todos os instrumentos obtiveram estimações de rendimento que ficaram até três pontos percentuais diferentes (valores absolutos) dos valores obtidos pela norma IEEE 112. Entretanto, para carregamentos abaixo de 50 %, a diferença entre os valores estimados e calculados para a eficiência foi significativa.

Nos testes realizados em campo, somente são apresentados resultados para o ponto de operação em que se encontrava o motor no momento da medição. Os motores não foram retirados e ensaiados para se estabelecer a referência de rendimento segundo o procedimento da norma IEEE 112. O artigo [21] apresenta apenas a comparação de resultados entre os três equipamentos, sendo que eles apresentaram resultados divergentes. Por exemplo, para um motor de 200 hp antigo, os resultados para a estimação da eficiência pelo Baker foi de 95,4 %, para o PdMA de 90,9 % e para o Weyerhaeuser de 82,3 %. Há uma diferença entre os valores máximos de aproximadamente 13 %.

Pode-se concluir que apesar dos bons resultados obtidos para os testes com motores novos, os seguintes problemas são evidentes no uso destes três equipamentos:

- O método utilizado pelo equipamento da PdMA é desconhecido, e o fato de apresentar resultados praticamente constantes para toda a faixa de carregamento do motor representa uma inconsistência;
- No equipamento da Weyerhaeuser, os resultados para carregamentos abaixo de 50 % foram bastante discrepantes em relação aos obtidos pelo método da norma IEEE 112. Além disso, o método faz uso do valor de corrente em vazio obtido de dados de placa dos fabricantes;

- No caso da Baker, os resultados são dependentes do conhecimento da resistência do estator que, para ser obtida de forma precisa, requer intrusão no processo.

Os resultados não satisfatórios obtidos com a estimação do rendimento de um motor antigo indicam que, quando o motor sofre alteração nas suas características originais de fábrica, os métodos implementados nos equipamentos podem ser imprecisos, uma vez que todos são direta ou indiretamente dependentes dos dados de placa obtidos dos fornecedores.

3. ALGORITMOS GENÉTICOS

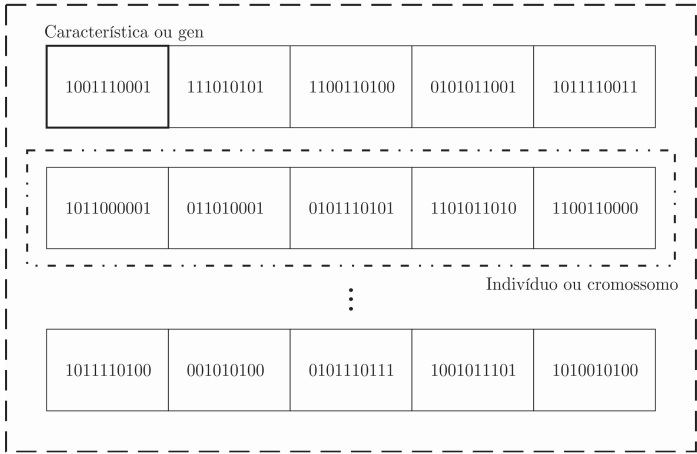
O método adotado neste trabalho para a estimação do rendimento de MITs em campo é o método do circuito equivalente, onde são determinados os valores dos parâmetros do modelo do MIT para possibilitar o cálculo do seu rendimento. Para a estimação dos valores dos parâmetros do modelo do MIT, a técnica utilizada é a dos algoritmos genéticos. Neste capítulo é feita uma apresentação geral da teoria dos algoritmos genéticos (AG) e das peculiaridades da sua aplicação ao caso de estudo.

3.1 TEORIA GERAL DOS ALGORITMOS GENÉTICOS

Um Algoritmo Genético é um método de otimização inspirado nas teorias genéticas e de evolução que manipula sequências de dados representando uma possível solução para um problema. São considerados algoritmos de busca que se valem da teoria da seleção natural. São definidos por três elementos principais: o espaço de busca, onde são consideradas todas as possibilidades de solução de um determinado problema, a função de avaliação (função de aptidão), que é uma maneira de avaliar os membros do espaço de busca em relação à melhor solução para o problema, e o processo de codificação, que permite a abstração do domínio do problema, trabalhando-se com representações dos seus elementos [22-23].

Cada proposta de solução para o problema é denominada cromossomo ou indivíduo, o qual pode ser composto por diversos genes ou características, representando, por exemplo, parâmetros de um modelo que se deseja determinar. A Figura 3.1 apresenta uma sequência de indivíduos compondo uma população de soluções para um problema.

Figura 3.1 - População de cromossomos representados na forma binária.



Uma vantagem dos algoritmos genéticos é que a busca é realizada em diferentes regiões do espaço de soluções, tornando a técnica independente dos valores iniciais adotados e com menor probabilidade de apresentar como solução um mínimo local.

3.1.1 Formas de Codificação

Existem três abordagens distintas que são utilizadas para realizar o processo de codificação dos algoritmos genéticos. A codificação clássica (ou binária) utiliza sequências de bits. A codificação real utiliza diretamente valores reais. A codificação inteira utiliza apenas valores inteiros.

A representação em números binários é a forma mais adequada para tornar a técnica independente do domínio de atuação. Porém, com a necessidade de maior precisão numérica, as cadeias de bits se tornam excessivamente longas, o que acarreta na necessidade de um esforço computacional maior, causando também um consumo maior de tempo até a convergência à solução.

A representação real, apesar de ser dependente da aplicação, exige menor esforço computacional e permite um controle maior das funções que gerarão as novas populações. Na codificação real, os operadores que geram as novas populações de indivíduos são implementados de forma

diferente do método utilizado na técnica tradicional de codificação binária.

A representação em números inteiros é limitada a casos específicos em que a população possa ser assim representada, como por exemplo, na determinação da quantidade ótima de produção ou de transporte de mercadorias.

3.1.2 Descrição do Algoritmo

O algoritmo numa visão simplificada pode ser descrito da seguinte forma:

a) Inicialmente é criada aleatoriamente uma população de soluções para o problema;

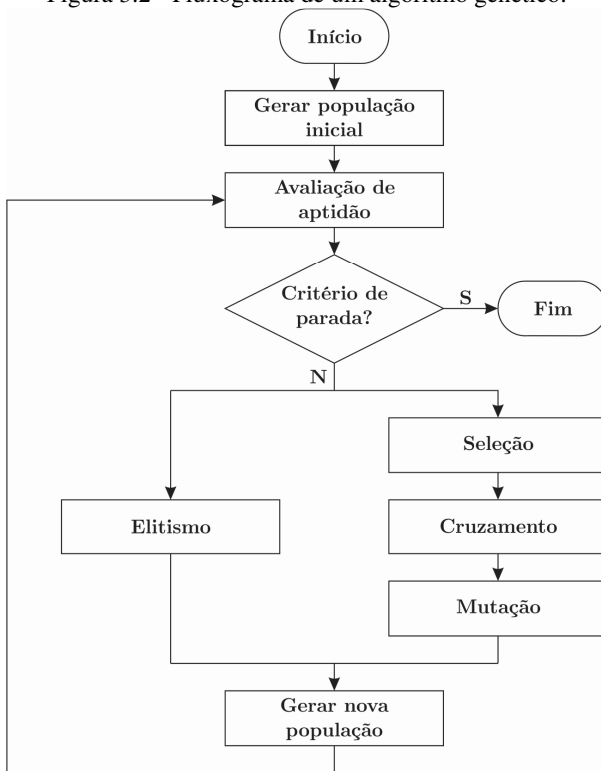
b) Todos os membros da população são avaliados segundo uma função objetivo que se deseja minimizar ou maximizar, classificando-os segundo um índice de aptidão.

c) Entre os membros mais aptos da população inicial são aplicadas diversas operações de transformação genética para a criação de uma nova população. As operações de transformação genéticas que são aplicadas sobre os membros selecionados da população são o cruzamento (“*cross over*”) e a mutação, que ocorrem concomitantemente com o elitismo.

O processo é iterativo, sendo concluído quando se atinge um número determinado de gerações ou um valor estabelecido para a função objetivo.

Um fluxograma da técnica de algoritmo genético é apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Fluxograma de um algoritmo genético.



3.1.3 O Processo de Seleção

Nos algoritmos genéticos, a “reprodução” inicia com o processo de seleção dos melhores indivíduos da população, separando-os em uma “fila de acasalamento”. Para a seleção, inicialmente é realizada a avaliação de cada elemento da população através de uma função a ser minimizada ou maximizada. Baseando-se nas características de cada indivíduo da população, calcula-se o valor da função de aptidão para este indivíduo. Por exemplo, na busca de parâmetros para um modelo matemático de um sistema, a função de aptidão a ser minimizada seria a diferença entre o valor real (medido em campo) de uma grandeza e o valor simulado da mesma grandeza a partir dos parâmetros do modelo. Num processo de otimização multiobjetivos, têm-se mais de uma função a minimizar ou a maximizar. A solução mais simples é a transformação das

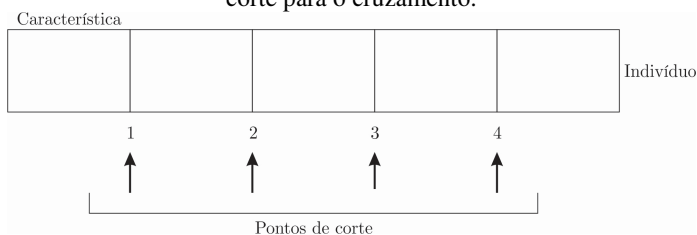
diversas funções em uma única função, a qual pode ser a soma ponderada das funções individuais.

Apesar de privilegiar os indivíduos com melhor aptidão, no processo de seleção deve ser assegurada a participação dos menos aptos para garantir a diversidade na geração de uma nova população. Para tanto, um método bastante utilizado é o da “roleta viciada”, uma roleta virtual na qual cada indivíduo recebe uma quantidade de bilhetes proporcional à sua avaliação (a soma dos bilhetes deve ser 100), sendo selecionado o indivíduo com o bilhete escolhido pela roleta. Os indivíduos mais aptos têm maiores chances de se reproduzir, pois terão sempre mais bilhetes. Porém, em função da aleatoriedade da roleta, os menos aptos também podem ser selecionados.

3.1.4 O Cruzamento

Cruzamento (“*cross over*”) consiste em mixar características de diferentes indivíduos selecionados como pais. Diversas técnicas de cruzamentos são discutidas na literatura, sendo a mais simples a que faz a substituição direta de características entre dois indivíduos. Depois de selecionados dois indivíduos pais pelo módulo de seleção, um ponto de corte é selecionado. O ponto de corte constitui uma posição entre duas características e cada indivíduo de “ n ” características contém “ $n-1$ ” pontos de corte, como apresentado na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Representação de um indivíduo com 5 características e 4 pontos de corte para o cruzamento.



Selecionado o ponto de corte, os pais são separados em duas partes: uma à esquerda do ponto de corte e outra à direita, não necessariamente do mesmo tamanho. O primeiro filho é composto através da concatenação da parte esquerda do primeiro pai com a parte direita do segundo pai e o segundo filho é composto através da concatenação das partes que

sobraram. Depois de compostos os filhos, entra em ação o operador de mutação.

Exemplos de outras formas de cruzamento são:

a) cruzamentos com dois pontos de corte, onde para a geração dos cromossomos filhos são trocadas as características que ficam entre os dois limites selecionados dos pais;

b) cruzamento uniforme, o qual é aplicado no caso da representação binária, onde se considera a troca de apenas um bit entre características dos pais;

c) cruzamento aritmético, aplicado no caso da representação real e onde é realizada uma operação aritmética entre dois genes de cromossomos pais para a geração do cromossomo filho, por exemplo, a média aritmética.

Associada à operação de cruzamento, tem-se uma taxa de probabilidade que define se o cruzamento entre os dois pais selecionados deve ocorrer ou não. Normalmente esta taxa deve ser alta e, em muitos casos, é considerada unitária, ou seja, considera-se que o cruzamento ocorre em 100 % dos casos. No caso da taxa não ser unitária, um gerador randômico define uma variável, que se for maior que a taxa pré-definida, implicará na não ocorrência do cruzamento, passando os pais para a etapa de mutação sem qualquer alteração.

3.1.5 Mutação

A mutação é a alteração em uma ou mais características do indivíduo analisado através de um processo aleatório de escolha dentro do espaço de busca da característica.

Uma taxa de probabilidade (taxa de mutação) define o percentual de indivíduos da população do AG que deve sofrer a mutação. Uma pequena taxa de mutação é suficiente para evitar que o algoritmo genético fique estagnado em um mínimo local, além de possibilitar que se chegue a qualquer ponto do espaço de busca. Com uma taxa muito alta, a busca se torna essencialmente aleatória. A taxa de mutação normalmente aplicada em algoritmos genéticos é de no máximo 1 % [28].

A aplicação da mutação inicia com a geração de um número aleatório entre 0 e 1. Se ele for menor que a taxa de mutação definida para o algoritmo o operador atua sobre a característica (parâmetro) do indivíduo em análise, alterando o seu valor aleatoriamente. Repete-se então o processo para todas as características dos dois indivíduos provenientes do cruzamento. Diversas modalidades de mutação podem

ser consideradas. No caso de algoritmos genéticos com codificação binária, a mutação ocorre pela inversão de um bit da característica selecionada. No caso de codificação real, de forma similar, um valor randômico dentro do espaço de busca da característica pode ser gerado ou um valor percentual pode ser acrescido ou diminuído da mesma, garantido assim uma variação menor no indivíduo filho gerado.

Com a mutação é concluído o processo de criação da nova população que irá substituir a população anterior, iniciando uma nova avaliação da função objetivo para cada indivíduo.

3.1.6 Elitismo

O elitismo é uma técnica utilizada para melhorar a convergência dos algoritmos. A técnica consiste em se escolher os melhores indivíduo de cada geração e passá-los à geração seguinte sem que os mesmos tenham sofrido cruzamento ou mutação, para que conservem suas características consideradas boas. A utilização do elitismo faz com que o algoritmo convirja mais rápido, pois evita que os elementos mais aptos sejam perdidos ou modificados. O elitismo ocorre de forma paralela ao cruzamento e à mutação, ou seja, os indivíduos de uma população com melhor aptidão segundo a função objetivo são transferidos diretamente para a nova população. Ao mesmo tempo, estes indivíduos concorrerão para participar das etapas de cruzamento e de mutação e formar o restante da nova população. A taxa de elitismo define o quanto da nova geração será formada pelos melhores indivíduos da geração anterior e, portanto, não deve apresentar valores altos. Valores típicos para a taxa de elitismo são de no máximo 20 % [22].

3.1.7 Elementos Estocásticos Associados aos Algoritmos Genéticos

Na descrição apresentada sobre os algoritmos genéticos, destacam-se um grande número de variáveis aleatórias envolvidas no processo e que podem determinar a convergência para uma solução ótima ou não do problema analisado.

O tamanho da população é uma primeira escolha que se deve fazer ao utilizar os algoritmos genéticos. Uma população muito grande requer um tempo de processamento maior, mas garante um número maior de possibilidade para se achar a solução do problema, principalmente quando

o espaço de busca, ou seja, a faixa de variação de cada parâmetro que se deseja determinar for muito grande em relação ao valor do próprio parâmetro.

Os índices que definem a taxa de probabilidade de ocorrência das operações de elitismo, cruzamento e mutação também exercem influência nos resultados a serem obtidos e na velocidade de convergência.

Embora as referências bibliográficas [22-23] indiquem o uso de uma alta taxa para a operação de cruzamento e uma baixa taxa para a mutação, o valor a ser utilizado em cada caso pode variar, sendo difícil estabelecer se uma melhora de desempenho do algoritmo se deu pela alteração destes índices ou pela aleatoriedade da formação de uma nova população inicial num novo experimento. Em relação à taxa de cruzamento, uma vez que seja utilizado o operador de elitismo, garantindo assim a presença dos melhores indivíduos nas futuras gerações, não há razão para se utilizar uma taxa de cruzamento menor que 100 %, ou seja, deve-se aplicar o operador a todos os elementos selecionados para gerar a nova geração. Em relação à taxa de mutação, uma proposta destacada em [30] é iniciar as primeiras gerações com um índice alto, garantindo a inclusão de novos elementos de todo o espaço de busca enquanto o algoritmo procura a região de mínimo global. À medida que as gerações avançam, o índice de mutação é diminuído gradativamente ao seu valor mínimo, diminuindo-se a aleatoriedade do algoritmo.

Outros elementos que devem ser definidos na aplicação do algoritmo genético para um caso particular são: a forma de codificação dos indivíduos em binário, real ou inteiro; os métodos a serem utilizados para a execução da seleção, cruzamento e mutação; e o número de gerações a serem criadas.

Assim, dependendo da natureza do problema analisado pelo método dos algoritmos genéticos fica difícil determinar quais das escolhas realizadas podem estar colaborando para a não convergência da solução, principalmente se mais de uma delas estiverem influenciando simultaneamente neste sentido.

3.2 ALGORITMOS GENÉTICOS NA DETERMINAÇÃO DOS VALORES DOS PARÂMETROS DO MODELO DO MIT

Na última década vários trabalhos foram publicados descrevendo a aplicação de algoritmos genéticos na obtenção de valores de parâmetros do motor de indução, alguns já considerando a aplicação destes valores de parâmetros para a determinação do rendimento do motor [24-28].

Recentemente, o trabalho [29] considera o uso desta técnica para determinar o rendimento de motores em sistemas desbalanceados de tensão.

Em [25], um algoritmo genético com codificação binária é utilizado para achar quatro parâmetros do modelo do motor de indução (X_1 , R_f , X_m , e R_2). No método proposto em [25], a resistência do estator (R_1) deve ser medida e o valor de X_2 é obtido a partir de X_1 considerando uma relação definida segundo a classe do motor. As perdas suplementares são determinadas por percentual da potência de saída, segundo a norma IEEE 112, e as perdas mecânicas são incluídas junto às perdas no ferro. O método trabalha com uma população de 250 indivíduos e codificação de 14 bits.

O mesmo modelo e a mesma consideração sobre as perdas mecânicas feitas em [25] são utilizados em [24], que considera a obtenção dos valores de todos os seis parâmetros. Para tanto, utiliza medições em diversos pontos de carga e acrescenta ao modelo duas resistências para considerar a variação dos parâmetros R_1 e R_2 com a temperatura. Também utiliza codificação binária de 16 bits com população de 150 indivíduos. Sua função objetivo é a impedância de entrada nos diversos pontos de carga. Utiliza taxa de cruzamento de 95 % e inicia a taxa de mutação com 30 %, reduzindo-a a cada nova geração.

Em [26] o método proposto utiliza três séries de dados de medidas elétricas e de velocidade, e considera o valor da resistência no estator obtido por medição. Além disto, propõe um modelo equivalente alternativo que apresentou resultados piores e é descartado pelos próprios autores. Em [27] também são utilizadas três séries de dados de medidas no motor, e a medição da resistência do estator. O modelo utilizado considera uma resistência para representar as perdas suplementares.

O algoritmo genético apresentado em [30] utiliza codificação binária de 25 bits para achar os valores de quatro parâmetros: X_1 , R_f , X_m , e R_2 . A reatância de dispersão do rotor (X_2) é obtida a partir de X_1 segundo relações definidas em norma para a classe do motor, de maneira idêntica ao método apresentado em [25]. Considera R_1 medido com o motor em operação através de um método que sobrepõe uma fonte contínua à alimentação do motor, o que é bastante intrusivo. O algoritmo genético utiliza população de 500 indivíduos e até 10.000 gerações. As perdas suplementares são obtidas de valores nominais de norma. As perdas rotacionais, quando consideradas, são incluídas como mais um elemento a ser estimado pelo algoritmo genético.

Em [28] é apresentado um algoritmo genético para determinar os valores dos parâmetros do modelo do motor, desconsiderando-se neste a

resistência que representa as perdas no ferro (R_f). Não aborda o rendimento do motor e, portanto, não considera as perdas suplementares, mecânicas e no ferro.

O desbalanceamento de correntes é considerado no método apresentado em [29] onde os valores dos parâmetros do modelo de sequência positiva e negativas são estimados por um algoritmo de busca baseado nas correntes e potências em cinco diferentes pontos de operação. Neste método são feitas as seguintes considerações: a resistência do estator é conhecida; utiliza-se uma relação entre X_1 e X_2 ; o total de perdas mecânicas é considerado igual a 1,2 % da potência de entrada; e o total de perdas suplementares é assumido como 1,8 % da potência nominal.

Na maioria dos trabalhos referenciados, os erros percentuais na determinação do rendimento do motor foram menores que 5 %, comparando-se com a medição de rendimento usando métodos tradicionais da norma IEEE. Entretanto, diversas considerações são feitas em cada um dos casos, restringindo a aplicabilidade do método para a determinação do rendimento de motores em campo de maneira não intrusiva. A maioria dos métodos não faz a estimação da resistência do estator, considerando o seu valor um parâmetro de entrada a ser obtido por medição direta. Outra consideração utilizada em vários métodos é a relação de projeto, conforme a classe do motor, entre as impedâncias do estator e do rotor (X_1 e X_2), sendo estimado apenas um valor para uma delas. Também é bastante comum eliminar a resistência que considera as perdas no ferro do modelo do motor. Isto equivale a desconsiderar esta parcela de perdas, o que pode implicar num erro significativo. Além disto, para melhorar a eficiência dos algoritmos, em alguns casos considera-se a utilização de medições de tensão, corrente e potência de entrada em diferentes pontos de operação do motor, o que limita a aplicabilidade do método, pois na indústria diversas aplicações não permitem a alteração do seu ponto de funcionamento.

3.3 CARACTERISTICAS DO ALGORITMO GENÉTICO UTILIZADO NA METODOLOGIA

A aplicação de algoritmos genéticos envolve uma série de fatores com relação direta sobre os resultados que podem ser alcançados e sobre os custos computacionais envolvidos. Destacam-se entre estes fatores: o tamanho da população, o número de gerações, os índices percentuais de elitismo e de mutação, o operador de seleção e o operador de cruzamento.

Os valores do tamanho da população e do número de gerações utilizadas nos algoritmos foram determinados através de processo empírico experimental, onde diversas variações e combinações foram verificadas até que houvesse a convergência dos resultados. Assim as populações foram definidas com até 2.000 indivíduos sendo consideradas até 10.000 gerações. Como critério de parada alternativo à execução de todas as gerações, o algoritmo é interrompido quando o valor da função de avaliação ficar abaixo de uma constante ε igual 0,00001. Para os percentuais de elitismo, mutação e cruzamento foram seguidas as orientações das referências apresentadas nas seções acima. Para cada nova geração 10 % da população é obtida por “elitismo”, sendo todo o restante determinada por “cruzamento” de indivíduos selecionadas por “roleta viciada”. Os indivíduos resultantes do cruzamento sofrem mutação de algumas de suas características em 2% dos casos (índice de mutação).

Neste trabalho, o algoritmo genético implementado segue fielmente o fluxograma apresentado na Figura 3.2, utilizando-se como operador de cruzamento o “*Real-Biased Crossover Operator*” [31].

4. A METODOLOGIA PROPOSTA PARA A DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DO MIT EM CAMPO

O método desenvolvido para determinar o rendimento de motores em campo é inovador. É um método baseado no circuito equivalente do MIT. Os valores dos parâmetros do circuito equivalente do MIT são determinados a partir de medições em campo e de informações de catálogos de fabricantes. São duas as etapas consideradas no método.

Na primeira etapa as informações de catálogos de fabricantes são utilizadas para determinar um conjunto de valores de parâmetros para o modelo do MIT que irão compor um banco de dados de motores conjuntamente com as informações fornecidas pelos fabricantes. Estes conjunto de valores de parâmetros para o modelo servirá como primeira aproximação para a busca de valores da segunda etapa. É importante destacar que os dados de catálogo fornecidos pelos fabricantes contemplam tipos comerciais de motores e são baseados em dados de projeto, ensaios por amostragem e estatísticas. Sendo assim, o motor que está instalado em campo, mesmo quando novo, não necessariamente terá as características idênticas às apresentadas nos dados de catálogo do seu modelo.

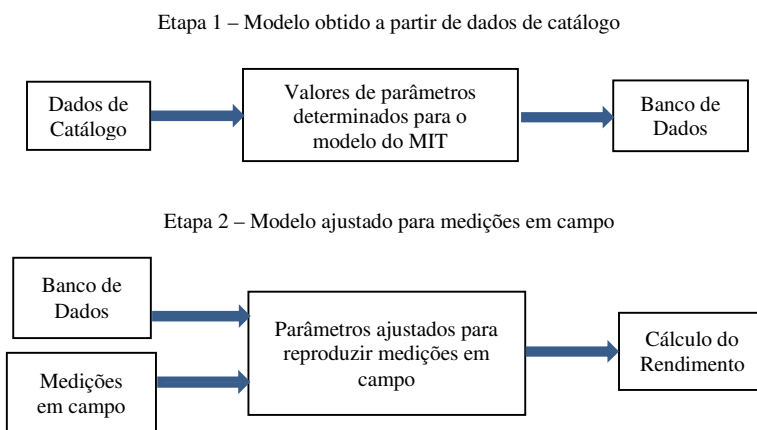
A partir de valores de parâmetros do modelo baseados em dados de catálogo e de medidas realizadas em campo, são realizadas novas buscas de valores de parâmetros para que o modelo represente o MIT no ponto de operação desejado. Com os novos valores de parâmetros pode-se calcular o rendimento do motor e fazer uma avaliação precisa da sua eficiência energética e da viabilidade econômica da sua troca por um motor novo. Um diagrama simplificado da metodologia é apresentada na Figura 4.1.

Comparando com os trabalhos estudados na literatura, e apresentados nos capítulos anteriores, uma inovação da metodologia proposta consiste na busca dos valores de todos os parâmetros do modelo. Nos trabalhos estudados, são utilizados resultados de dados estatísticos e de relações entre parâmetros para reduzir o número de variáveis a serem determinadas. Além disto, muitos dos métodos propostos na literatura requerem a medição direta da resistência do estator [18-19] [25- 27] [30], um dos principais parâmetros do motor do ponto de vista das perdas e, consequentemente, do cálculo do rendimento.

Outra contribuição alcançada é a de incluir a estimação das perdas mecânicas por atrito e ventilação na metodologia. Normalmente, quando considerada, a perda por atrito e ventilação é obtida por valores

percentuais da potência nominal de saída, assim como ocorre para as perdas suplementares. Para as perdas suplementares, o uso deste expediente é previsto nas normas IEEE 112 e IEC 60034-2-1 como opção à sua medição direta, pois se trata de um procedimento de alto grau invasivo. Para as perdas mecânicas, as normas preveem ensaios em laboratório com o motor operando sem carga. Os métodos aplicados em campo apresentados na bibliografia utilizam percentuais da potência nominal baseados em valores estatísticos [13-14]. Apesar de fazer uso destes dados estatísticos na heurística incluída na metodologia proposta, a estimação do valor das perdas mecânicas é contemplada no algoritmo desenvolvido. Além disto, considerou-se também a possibilidade de que o valor destas perdas se alterem com o tempo de uso do motor, sendo utilizado um modelo alternativo para o MIT, que inclui elementos representativos destas perdas.

Figura 4.1 – Diagrama simplificado da metodologia para a determinação do rendimento de MITs.

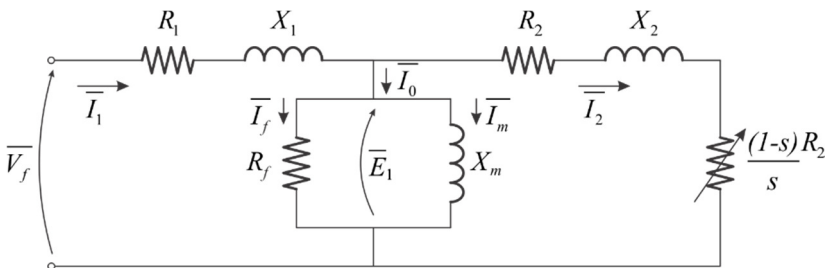


Neste capítulo apresenta-se inicialmente um equacionamento dos modelos do MIT utilizados na metodologia. Em seguida é realizada a descrição do método para a determinação dos valores dos parâmetros do modelo a partir de dados de catálogo (etapa 1) e das alterações realizadas no modelo para a representação das perdas mecânicas e suplementares. Por fim, descreve-se a etapa de determinação dos novos valores para os parâmetros do modelo utilizando-se as medidas realizadas em campo (etapa 2).

4.1 EQUACIONAMENTO DOS MODELOS DO MIT

A Figura 4.2 apresenta novamente, para facilitar a compreensão, o modelo por fase em regime permanente para tensões balanceadas senoidais de um MIT, definido em norma, e já visto no capítulo 2.

Figura 4.2 - Circuito equivalente do motor de indução.



As principais relações para o motor trifásico estabelecidas a partir deste modelo, e empregadas nos algoritmos, são:

Corrente I1:

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{V}_f}{Z_t} \quad (4.1)$$

$$Z_t = Z_1 + (Z_m // Z_2) \quad (4.2)$$

$$Z_m = (R_f // X_m) \quad (4.3)$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (4.4)$$

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (4.5)$$

Corrente I2:

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_1 - \bar{I}_0 \quad (4.6)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{I}_1 Z_m}{(Z_m + Z_2)} \quad (4.7)$$

Tensão no ramo magnetizante:

$$\overline{E}_1 = \overline{V}_f - \overline{I}_1 Z_1 \quad (4.8)$$

Perdas Joule no estator:

$$P_{j1} = 3R_1 I_1^2 \quad (4.9)$$

Perdas no ferro:

$$P_{fe} = \frac{3E_1^2}{R_f} \quad (4.10)$$

Perdas Joule no rotor:

$$P_{j2} = 3R_2 I_2^2 \quad (4.11)$$

Potência de entrada:

$$P_{ent} = 3I_1 V_f \cos \phi \quad (4.12)$$

Potência no entreferro ou transferida ao rotor:

$$P_{ag} = P_{ent} - P_{j1} - P_{fe} = 3 \frac{R_2}{s} I_2^2 \quad (4.13)$$

Potência mecânica interna ou potência convertida:

$$P_{mec} = (1-s)P_{ag} = P_{ag} - P_{j2} \quad (4.14)$$

A potência de saída no eixo é a potência mecânica interna diminuindo as perdas por atrito e ventilação (perdas rotacionais) e as perdas suplementares, as quais não são representadas no modelo do MIT.

$$P_{sai} = P_{mec} - P_{rot} - P_{sup} \quad (4.15)$$

Tendo em vista que as perdas rotacionais e suplementares não são especificadas no modelo normatizado, vários autores propõem a utilização de modelos modificados. Em [32-34], considera-se a inclusão de uma resistência adicional R_{sup} em série com o ramo secundário do modelo para levar em conta as perdas suplementares, como pode ser visto na Figura 4.2. Esta modificação atende a orientação da norma IEEE de

que as perdas suplementares são consideradas proporcionais ao quadrado do valor eficaz da corrente I_2 , visto que a potência dissipada na resistência R_{sup} é dada por (4.16).

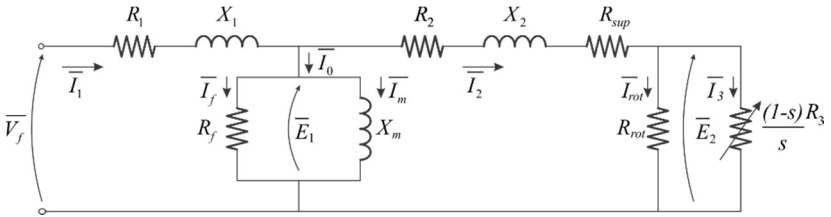
$$P_{sup} = 3I_2^2 R_{sup} \quad (4.16)$$

A mesma expressão, rearranjada para a forma dada em (4.17), resulta no valor de R_{sup} se o valor da perda suplementar e da corrente I_2 são conhecidos para um determinado ponto de operação. Porém, a inclusão da resistência no modelo altera o valor da corrente I_2 , a qual é utilizada no cálculo de R_{sup} , sendo necessário um procedimento iterativo para ajustar estes valores.

$$R_{sup} = \frac{P_{sup}}{3I_2^2} \quad (4.17)$$

A referência [35], além de utilizar R_{sup} , sugere a inclusão de uma resistência R_{rot} para levar em conta as perdas mecânicas. Este elemento, cujo valor independe do carregamento mecânico, é conectado em paralelo com a resistência que representa a potência mecânica convertida (Figura 4.3).

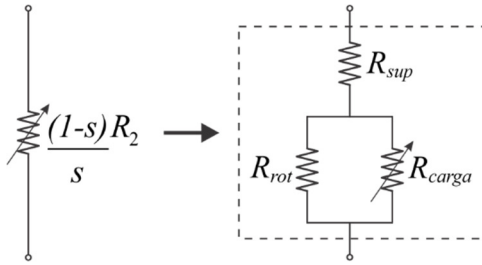
Figura 4.3 - Circuito equivalente do MIT com representação de perdas mecânicas e suplementares.



No circuito original da norma (Figura 4.2), a potência dissipada na resistência variável $R_2(1-s)/s$ inclui a potência mecânica útil, as perdas suplementares e a perda rotacional. Quando se representa cada parcela separadamente, o valor da resistência correspondente à carga no eixo deve ser ajustado para não contabilizar repetidamente as perdas. Sendo assim, propõe-se a decomposição mostrada na Figura 4.4, através da qual se representam separadamente as parcelas de potência sem distorcer o

modelo com inclusões arbitrárias. Este procedimento também dispensa o processo iterativo para a determinação de R_{sup} , simplificando o procedimento de encontro dos parâmetros do circuito equivalente.

Figura 4.4 - Decomposição da resistência variável para representar a potência útil, perdas suplementares e perdas mecânicas.



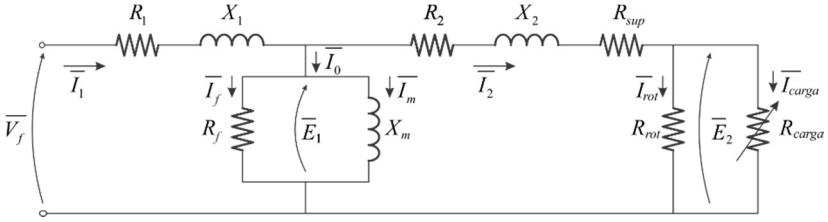
Nesta decomposição, R_{sup} continua sendo percorrido por I_2 , mantendo assim o cálculo da perda suplementar por (4.16). A potência mecânica é representada pelas resistências R_{rot} e R_{carga} em paralelo, sendo a primeira referente às perdas rotacionais, e a última representa a potência de saída no eixo, que é dependente da carga. Partindo do cálculo da resistência equivalente do modelo decomposto, pode-se determinar a expressão de R_{carga} , conforme (4.18) e (4.19).

$$R_2 \frac{(1-s)}{s} = R_{sup} + \left(\frac{1}{R_{rot}} + \frac{1}{R_{carga}} \right)^{-1} \quad (4.18)$$

$$R_{carga} = \frac{1}{\frac{1}{R_2 \frac{(1-s)}{s} - R_{sup}} - \frac{1}{R_{rot}}} \quad (4.19)$$

O modelo utilizado na metodologia é mostrado na Figura 4.5 e tem seu equacionamento apresentado a seguir.

Figura 4.5 - Modelo proposto na metodologia para os resultados de campo.



Impedância de dispersão do estator:

$$\bar{Z}_1 = R_1 + jX_1 \quad (4.20)$$

Impedância do ramo de excitação:

$$\bar{Z}_m = \frac{R_f \cdot jX_m}{R_f + jX_m} \quad (4.21)$$

Impedância do ramo do rotor:

$$\bar{Z}_2 = R_2 + R_{sup} + \left(\frac{1}{R_{rot}} + \frac{1}{R_{carga}} \right)^{-1} + jX_2 \quad (4.22)$$

Impedância equivalente por fase do motor:

$$\bar{Z}_{eq} = \bar{Z}_1 + \frac{\bar{Z}_m \cdot \bar{Z}_2}{\bar{Z}_m + \bar{Z}_2} \quad (4.23)$$

Corrente eficaz de linha:

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{V}_f}{\bar{Z}_{eq}} \quad (4.24)$$

Perdas por efeito Joule no enrolamento do estator:

$$P_{j1} = 3R_1 I_1^2 \quad (4.25)$$

Tensão no ramo magnetizante do modelo do motor:

$$\bar{E}_1 = \bar{V}_f - \bar{Z}_1 \bar{I}_1 \quad (4.26)$$

Perdas no ferro:

$$P_{fe} = \frac{3E_1^2}{R_f} \quad (4.27)$$

Corrente eficaz do ramo secundário:

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_1 - \frac{\bar{E}_1}{\bar{Z}_m} \quad (4.28)$$

Potência ativa no entreferro transferida ao rotor:

$$P_{ag} = 3I_2^2 \operatorname{Re}\{\bar{Z}_2\} \quad (4.29)$$

Perdas por efeito Joule no enrolamento do rotor:

$$P_{j2} = 3I_2^2 R_2 \quad (4.30)$$

Resistência de perdas suplementares, a partir de valores referentes ao ponto de operação nominal:

$$R_{sup} = \frac{P_{sup_nom}}{3I_{2_nom}^2} \quad (4.31)$$

Perdas suplementares:

$$P_{sup} = 3I_2^2 R_{sup} \quad (4.32)$$

Tensão sobre as resistências em paralelo no ramo secundário:

$$\bar{E}_2 = \bar{E}_1 - (R_2 + R_{sup} + jX_2) \bar{I}_2 \quad (4.33)$$

Potência mecânica interna ou potência convertida:

$$P_{mec} = P_{rot} + P_{sai} \quad (4.34)$$

Perdas rotacionais:

$$P_{rot} = \frac{3E_2^2}{R_{rot}} \quad (4.35)$$

Potência mecânica útil:

$$P_{sai} = \frac{3E_2^2}{R_{carga}} \quad (4.36)$$

O modelo proposto contempla as perdas por efeito joule, as perdas no ferro, as perdas mecânicas e as perdas suplementares, sendo assim um modelo completo. Comparando os modelos, nota-se que o proposto é caracterizado por oito parâmetros dentro do circuito, enquanto o padronizado caracteriza-se por seis parâmetros no circuito e dois valores considerados externamente. O valor das perdas suplementares e, por consequência, o valor da resistência que as representa no circuito, é determinado diretamente a partir de porcentagens normalizadas, ou seja, não é um valor a ser encontrado pelo algoritmo de busca de parâmetros. Sendo assim, ambos os modelos possuem sete valores a se determinar,

sendo que, no proposto, as perdas rotacionais e suplementares ganham representação elétrica. Esta representação permite que se estude a variação das perdas no decorrer da vida útil do motor através da variação dos valores dos parâmetros correspondentes.

Neste trabalho, os dois modelos serão utilizados. O modelo da norma é utilizado com os dados de catálogo, considerando os motores novos. Neste caso as perdas rotacionais e suplementares para o ponto de operação nominal são calculadas em separado. A partir do modelo da norma e do conhecimento das perdas extras, não representadas por este modelo, determina-se as resistências R_{rot} , R_{sup} e R_{carga} . O valor desta última resistência depende do escorregamento. O modelo com estas resistências é utilizado na etapa de campo para considerar a possibilidade de variação de seus valores e das perdas que representam.

4.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DO MIT A PARTIR DE DADOS DE CATÁLOGO

4.2.1 Dados de placa fornecidos pelos fabricantes

Os seguintes conjuntos de dados são usualmente fornecidos nos catálogos de fabricantes [36]:

P_n	– Potência nominal (W e ou cv);
V_l	– Tensão nominal de linha (V);
p	– Número de polos;
n	– Rotação nominal (rpm);
I_n	– Corrente nominal (A);
I_p/I_n	– Corrente de partida referenciada à corrente nominal;
C_n	– Conjugado nominal (kgfm);
C_p/C_n	– Conjugado de partida referenciado ao conjugado nominal;
C_m/C_n	– Conjugado máximo referenciado ao conjugado nominal;
η_{100}	– rendimento nominal;
η_{75}	– rendimento com motor operando a 75 % da potência nominal;
η_{50}	– rendimento com motor operando a 50 % da potência nominal;
$fp_{100} (\cos \phi_{100})$	– fator de potência nominal;

$fp_{75}(\cos\phi_{75})$ – fator de potência com motor operando a 75 % da potência nominal;

$fp_{50}(\cos\phi_{50})$ – fator de potência com motor operando a 50 % da potência nominal;

Entre os dados fornecidos pelos fabricantes, faz-se ressalva à utilização da corrente e do torque de partida dos motores para a determinação dos valores dos parâmetros do seu modelo. Na partida, o comportamento dos fluxos no motor geralmente é diferente do que ocorre na operação na região de regime permanente.

Outro ponto a ser considerado na utilização dos dados fornecidos por fabricantes são os possíveis erros decorrentes de arredondamentos, pois pequenas variações nos valores publicados em catálogos podem resultar em alteração significativa no parâmetro do modelo que irá reproduzir a grandeza em questão, principalmente quando o parâmetro precisa atender a diferentes pontos de operação. Por exemplo, arredondamentos nos valores das correntes do motor no ponto de operação nominal e a 75 % e 50 % de carga, obtidos em ensaios, podem resultar num sistema de equações sem solução. Este fato torna os métodos de otimização mais vantajosos. Pois, mesmo que não haja um conjunto de parâmetros que satisfaça os dados de catálogo nos três pontos de operação, o algoritmo buscará uma solução que torne mínima a função erro definida como objetivo.

4.2.2 A Formulação do Problema

Inicialmente, o objetivo da metodologia é encontrar os valores dos parâmetros para o modelo do MIT, a fim de que este modelo, ao ser simulado, possa reproduzir os dados de catálogo fornecidos pelos fabricantes. Dentre os dados de catálogo a serem reproduzidos pelo modelo do MIT são considerados os valores de rendimento e de fator de potência nos três pontos de operação fornecidos, os quais, indiretamente, implicam em reproduzir a corrente no estator, em módulo e fase. Outras variáveis também consideradas na função a ser minimizada pelo algoritmo de busca são as potências de entradas ativa e reativa, também obtidas indiretamente a partir do rendimento e fator de potência.

Desta maneira, o problema pode ser resumido a uma minimização com múltiplos objetivos, sendo prioritária a obtenção dos valores das

correntes no estator, em módulo e fase, nos diferentes pontos de carga fornecidos.

Devido ao elevado número de parâmetros do modelo, diversas soluções podem atender aos dados de catálogo, tornando-se necessário restringir a busca através do estabelecimento de novas relações. Estas regras são baseadas em heurísticas e levantamentos estatísticos, sendo utilizadas muitas vezes como relações fixas, como é o caso da própria norma IEEE ao estabelecer a relação entre X_1 e X_2 segundo a classe do motor, apresentadas na Tabela 4.1. Entretanto, devido à sua natureza heurística, estas relações devem assegurar flexibilidade ao método de busca utilizado, servindo apenas como elemento excludente de soluções não conformes. No caso da relação entre X_1 e X_2 , pode-se assegurar que o valor de X_1 é menor ou igual ao valor de X_2 independentemente do motor.

Tabela 4.1: Relações entre os parâmetros X_1 e X_2 segundo a norma IEEE 112

Classe do Motor	X_1/X_2
A, D e motores bobinados	1
B	0,67
C	0,43

Neste trabalho, propõe-se a utilização como fonte de relações heurísticas para os parâmetros do modelo do motor a distribuição percentual das suas perdas. A distribuição percentual média das perdas no MIT foi apresentada no capítulo 2, sendo aqui reproduzida na Tabela 4.2 [8].

Tabela 4.2: Influência de cada perda na perda total.

Perdas	Fração da Perda Total (%)
P_{j1} (estator)	25-40
P_{j2} (rotor)	15-25
P_{rot} (atrito e ventilação)	5-15
P_{fe} (ferro)	15-25
P_{sup} (suplementares)	10-20

Esta distribuição de perdas pode variar segundo o tipo e potência nominal do motor. Sendo assim, a aplicação desta heurística pode ser implementada de duas maneiras: definindo-se faixas de valores para cada uma das perdas ou estabelecendo-se uma relação comparativa entre elas, ou seja, definindo-se qual deve ser a perda com maior percentual do total de perdas e assim por diante. Propostas de soluções para os conjuntos de parâmetros cujos resultados dos cálculos das perdas não atendem ao requisito desta heurística são desconsideradas. Para garantir flexibilidade

à metodologia, a faixa de valores ou a relação de grandeza entre os percentuais das perdas deverá ser alterada pelo operador do sistema quando não ocorrer convergência dos resultados. A experiência adquirida nos testes com a metodologia levou pela adoção da segunda maneira, ou seja, ter relações de grandezas entre os diferentes tipos de perdas do motor.

Outra regra utilizada como função de avaliação no algoritmo genético da metodologia está relacionada à perda rotacional. Uma contribuição deste trabalho foi a utilização da consideração de que a perda rotacional é praticamente constante [7] na função de avaliação do algoritmo genético. Sendo assim, nos pontos de carga de 100 %, 75 % e 50 % da potência nominal, a perda rotacional calculada para o modelo do MIT deve ser praticamente constante, considerando uma pequena margem de erro. Somente após a adoção desta regra excludente de indivíduos de uma geração é que os resultados obtidos com a aplicação dos algoritmos genéticos passaram a convergir.

4.2.3 Descrição da Metodologia Proposta para a Determinação dos Valores dos Parâmetros do MIT a partir de Dados de Catálogo

A ferramenta de otimização escolhida para a determinação dos parâmetros do modelo do motor é o algoritmo genético. Um dos pontos fundamentais na aplicação desta ferramenta é a definição da área de busca de cada um dos parâmetros a ser determinado. Assim, a determinação dos valores dos parâmetros do modelo do MIT a partir de dados de catálogo (1ª etapa da metodologia) é também executada em duas etapas.

Na primeira etapa são utilizadas diferentes técnicas analíticas e o próprio algoritmo genético para a determinação de um conjunto de valores iniciais para os parâmetros do MIT. Apesar dos resultados servirem exclusivamente ao propósito de definição da área de busca do algoritmo principal da segunda etapa, a primeira etapa da metodologia é rica em detalhes justamente devido ao equacionamento e às aproximações realizadas em cada uma de suas fases.

Na segunda etapa, tem-se a aplicação do algoritmo principal, usando-se a função de avaliação baseada no equacionamento dos valores fornecidos nos dados de catálogo. Além disto, são utilizadas regras que limitam o conjunto de “indivíduos” que podem fazer parte da solução do problema.

Determinação da 1ª aproximação para os parâmetros do motor

Através de procedimento analítico baseado no equacionamento do modelo do motor de indução, obtém-se uma primeira aproximação para os valores dos parâmetros deste modelo.

Considerando os dados fornecidos pelos fabricantes e o fluxo de potência no MIT, o seguinte sistema de equações pode ser montado para os três pontos de operação fornecidos:

$$P_{ent} = 3R_1 I_1^2 + P_{fe} + \frac{(P_{sai} + P_{rot} + P_{sup})}{(1-s)} \quad (4.37)$$

$$P_{ent75} = 3R_1 I_{175}^2 + P_{fe} + \frac{(P_{sai75} + P_{rot} + P_{sup75})}{(1-s_{75})} \quad (4.38)$$

$$P_{ent50} = 3R_1 I_{150}^2 + P_{fe} + \frac{(P_{sai50} + P_{rot} + P_{sup50})}{(1-s_{50})} \quad (4.39)$$

onde:

P_{ent} , P_{ent75} , P_{ent50} - são os valores das potências de entrada nos pontos de operação nominal, a 75 % e 50 % de carregamento;

P_{sai} , P_{sai75} , P_{sai50} - são os valores das potências de saída no eixo do motor nos pontos de operação nominal, a 75 % e 50 % de carregamento;

P_{sup} , P_{sup75} , P_{sup50} - são os valores das perdas suplementares do motor nos pontos de operação nominal, a 75 % e 50 % de carregamento;

I_1 , I_{175} , I_{150} - são os valores das correntes no estator do motor nos pontos de operação nominal, a 75 % e 50 % de carregamento;

s , s_{75} , s_{50} - são os valores do escorregamento do motor nos pontos de operação nominal, a 75 % e 50 % de carregamento;

As perdas no núcleo (P_{fe}) e as perdas rotacionais (P_{rot}) são consideradas constantes nos três pontos de operação dados pelo fabricante, resultando sete variáveis desconhecidas no conjunto das três equações principais. São elas: R_1 , P_{fe} , P_{rot} , s_{75} , s_{50} , P_{sup75} , P_{sup50} .

Considerando que o conjugado é proporcional ao escorregamento para cargas inferiores à nominal, pode-se estimar o valor do escorregamento a 75 % e a 50 % da carga através das seguintes relações:

$$\frac{T_{75}}{T} = \frac{s_{75}}{s} \quad (4.40)$$

$$\frac{T_{50}}{T} = \frac{s_{50}}{s} \quad (4.41)$$

$$P_{sai} = T \omega_s (1-s) \rightarrow T = \frac{P_n}{\omega_s (1-s)} \quad (4.42)$$

$$P_{sai75} = T_{75} \omega_s (1-s_{75}) \rightarrow T_{75} = \frac{P_{75}}{\omega_s (1-s_{75})} \quad (4.43)$$

$$P_{sai50} = T_{50} \omega_s (1-s_{50}) \rightarrow T_{50} = \frac{P_{50}}{\omega_s (1-s_{50})} \quad (4.44)$$

onde:

T , T_{75} , T_{50} - são os valores dos conjugados de saída nos pontos de operação nominal, a 75 % e 50 % de carregamento;
 ω_s - é o valor da velocidade angular síncrona.

Realizando manipulações algébricas com as equações (4.40 a 4.44) tem-se as seguintes relações:

$$s_{75} = \frac{1 - \sqrt{1 - 4(0,75s - 0,75s^2)}}{2} \quad (4.45)$$

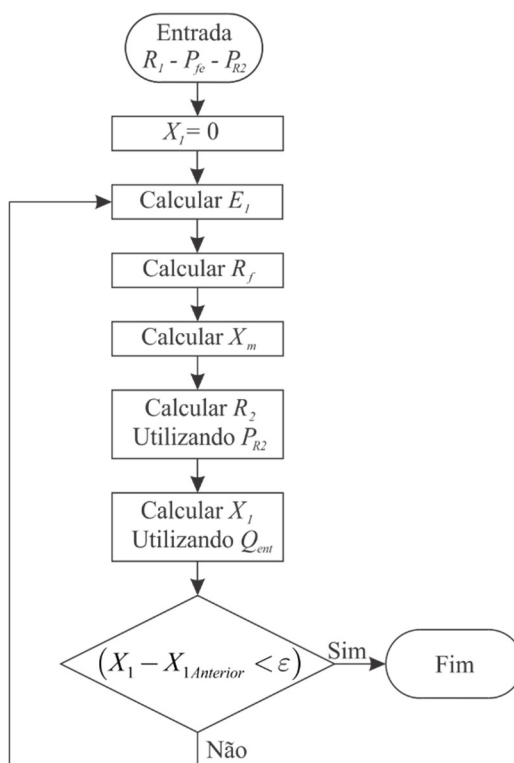
$$s_{50} = \frac{1 - \sqrt{1 - 4(0,5s - 0,5s^2)}}{2} \quad (4.46)$$

Os valores de s_{75} e s_{50} , obtidos pelas equações (4.45) e (4.46), servem para definir a área de busca destes parâmetros na aplicação do algoritmo genético da primeira etapa. A área de busca dos demais parâmetros nesta etapa é definida por valores referenciados à potência nominal do motor. A função objetivo do algoritmo genético é a

minimização do erro entre os dois lados das equação (4.37) a (4.39), ou seja, o objetivo é minimizar o erro entre os valores das potências de entrada obtidas pelos dados de catálogo e calculadas pelas referidas equações.

Ao final da aplicação do algoritmo genético se obtém valores estimados para R_1 , para a perda no ferro (P_{fe}) e para as outras cinco variáveis já citadas, podendo-se calcular a potência no entreferro (P_{ag}) e a perda na resistência do rotor (P_{j2}). A partir destes dados, o método segue o diagrama sequencial apresentado na Figura 4.6 para calcular a primeira aproximação dos parâmetros do modelo do motor.

Figura 4.6 - Algoritmo para determinar os valores iniciais para os parâmetros do motor



Inicialmente, X_1 é considerado igual a zero, e calcula-se a tensão no ramo magnetizante (equação 4.47) e o valor de R_f (equação 4.48).

$$E_1 = V_f - I_1(R_1 + jX_1) \quad (4.47)$$

$$R_f = \frac{3|E_1|^2}{P_{fe}} \quad (4.48)$$

Assumindo que praticamente toda a componente imaginária da corrente de I_1 (estima-se um percentual de 95 %) está relacionada à X_m o valor deste parâmetro é aproximado pela equação 4.49 [37-38].

$$X_m = \frac{E_1}{0,95 I_1 \sin(\phi)} \quad (4.49)$$

O valor da resistência R_2 é obtido do valor da perda no rotor usando-se os valores de X_2 igual ao de X_1 , independentemente da classe do motor. A perda no rotor é dada pela equação 4.50 onde a corrente I_2 é calculada em função de E_1 e a impedância da malha correspondente do circuito equivalente.

$$P_{r2} = \frac{3|E_1|^2 R_2}{\left(\left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + X_2^2 \right)} \quad (4.50)$$

Um novo valor de X_1 é calculado através do fluxo da potência reativa de entrada (equação 4.51) e o processo se repete até que a diferença entre o novo valor de X_1 e o anterior seja tolerável.

$$Q_m = 3X_1 I_1^2 + 3X_m I_m^2 + 3X_2 I_2^2 \quad (4.51)$$

2ª Etapa da obtenção dos valores dos parâmetros do modelo a partir dos dados de catálogo

Um novo algoritmo genético é utilizado para a determinação de todos os parâmetros do motor. Neste caso a função a ser minimizada pelo AG é a média ponderada dos valores das diferenças obtidas entre os dados de catálogo fornecidos pelos fabricantes e os mesmos dados calculados a partir do modelo avaliado. Na verdade, constatou-se que melhores resultados são obtidos utilizando-se como valores a serem minimizados

as correntes no estator do MIT, considerando-se módulo e fase, e os três pontos de operação fornecidos nos catálogos. Outras duas grandezas de referência que também integram a função de avaliação do AG são os valores da potência ativa e reativa de entrada no ponto de operação nominal, embora estejam inter-relacionadas com o módulo e fase da corrente no estator do MIT. Todas as grandezas usadas como referência são determinadas a partir do rendimento e do fator de potência fornecidos nos dados de catálogo. A função de avaliação utilizada é apresentada na equação 4.52.

$$F = \frac{P_I D_I + P_{I75} D_{I75} + P_{I50} D_{I50} + P_{Pent} D_{Pent} + P_{Qent} D_{Qent}}{P_t} \quad (4.52)$$

Onde:

F - Função de avaliação do AG;

P_I - Peso da diferença na corrente nominal;

P_{I75} - Peso na diferença na corrente no ponto de carga de 75 %;

P_{I50} - Peso na diferença na corrente no ponto de carga de 50 %;

P_{Pent} - Peso na diferença na potência ativa de entrada nominal;

P_{Qent} - Peso na diferença na potência reativa de entrada nominal;

P_t - Soma de todos os pesos.

As diferenças nos valores das correntes e das potências são dadas pela equação 4.53.

$$D_x = \frac{Ref(x) - Calc(x)}{Ref(x)} \quad (4.53)$$

onde: $Ref(x)$ é o valor de referência da grandeza x obtido a partir dos dados de catálogo, e $Calc(x)$ é o valor calculado da grandeza x a partir do modelo do MIT com os valores dos parâmetros que estão sendo avaliados pelo AG. A função de avaliação apresentada em 4.52 é utilizada para definir a “aptidão” de cada “elemento” da população a cada nova geração criada pelo AG.

Além da função de aptidão, cada “elemento” da “população” do AG é testado em relação às funções heurísticas definidas como requisitos para a aceitação do conjunto de valores de parâmetros como solução para o modelo do MIT. Como já mencionado na seção 4.2.2, são utilizadas as relações de grandezas entre os percentuais de perdas do MIT que podem ser aplicadas por faixas de valores ou através de uma relação comparativa entre elas. As equações 4.54 a 4.57 expressam o primeiro caso, e a

equação 4.58 um exemplo do segundo. No caso das faixas de valores, as perdas suplementares não fazem parte das regras, uma vez que são atribuídas por valor percentual da potência de saída segundo as normas IEEE112 e NBR5383.

$$P_{j1max} \geq P_{j1} \geq P_{j1min} \quad (4.54)$$

$$P_{j2max} \geq P_{j2} \geq P_{j2min} \quad (4.55)$$

$$P_{rotmax} \geq P_{rot} \geq P_{rotmin} \quad (4.56)$$

$$P_{femax} \geq P_{fe} \geq P_{femin} \quad (4.57)$$

$$P_{j1} \geq P_{j2} \geq P_{fe} \geq P_{sup} \geq P_{rot} \quad (4.58)$$

Os valores mínimos e máximos dos percentuais das perdas são definidos pelo usuário do sistema, observando-se a Tabela 4.2, ou outra referência de valores para o motor em análise. Fica a cargo do operador decidir se utiliza a primeira ou a segunda abordagem, bem como a ordem a ser estabelecida na equação 4.58. O operador pode também optar por não utilizar a relação entre as perdas como critério restritivo da função de avaliação do AG. Como a relação entre as perdas não é fixa e pode variar de motor para motor a utilização deste critério requer sempre que se faça a análise dos resultados, aplicando-se um senso crítico para valores considerados inaceitáveis. Por exemplo, se a aplicação do AG sem a utilização destas heurísticas resultar num conjunto de valores de parâmetros em que o percentual das perdas joules no estator seja muito pequeno, deve-se considerar que a solução do AG levou a um resultado que não é real, embora tenha minimizado a função de avaliação. Pois é consenso que as perdas ôhmicas no estator são as maiores perdas no motor, como indicam os percentuais apresentados na Tabela 4.2. Assim, a utilização desta heurística no método de busca de valores de parâmetros para o modelo do MIT deve ser considerada como uma ferramenta auxiliar quando há dúvidas sobre a convergência dos resultados, ou para a decisão entre mais de uma solução encontrada pelo próprio método, num processo iterativo.

Outra condição necessária para qualquer conjunto de valores candidato à solução do AG é a apresentada na equação 4.59. Esta condição vem dos valores adotados nas normas IEEE112 e NBR5383 para a relação entre X_1 e X_2 , segundo a categoria do motor apresentada na

Tabela 4.1. Embora na metodologia proposta os valores dos dois parâmetros sejam igualmente buscados pelo algoritmo, pode-se estabelecer a condição da equação 4.59 como restritiva para a solução. Para todos as classes de motores da Tabela 4.1 esta relação é estabelecida.

$$X_2 > X_1 \quad (4.59)$$

Por fim, uma condição restritiva adotada pelo algoritmo e determinante para a convergência de resultados, podendo-se considerar uma contribuição importante no processo de encontro de valores de parâmetros para o modelo do MIT, surge da característica das perdas rotacionais serem consideradas praticamente constantes para toda a faixa de carregamento. Na metodologia proposta, nos três pontos de operação definidos nos catálogos de fabricantes, o valor da perda rotacional é calculado segundo a equação 4.60. Nesta equação, o valor da potência de saída (P_{sai}) é conhecido nos três pontos de operação dados no catálogo. O valor da perda suplementar (P_{sup}) no ponto de carga nominal (100 %) é dado pelo critério da norma, podendo ser determinado para os dois outros pontos de operação do catálogo (75 % e 50 % de carga) em função da corrente no rotor calculada com o modelo formado com parâmetros em avaliação. A potência mecânica interna (P_{mec}) também é obtida através do modelo do MIT com os valores dos parâmetros em avaliação pelo AG.

$$P_{rot} = P_{mec} - P_{sup} - P_{sai} \quad (4.60)$$

Assim, definiu-se como condição necessária para a validação do conjunto de parâmetros que as perdas rotacionais nos três pontos de operação sejam aproximadamente constantes (equação 4.61). Em termos práticos, adotou-se um valor máximo de 10 % de variação entre os valores de P_{rot} no ponto de operação nominal e nos pontos de 75 % e 50 % de carregamento.

$$P_{rot} \cong P_{rot75} \cong P_{rot50} \quad (4.61)$$

Ao término da execução do algoritmo, tem-se um conjunto de valores para os seis parâmetros do modelo tradicional do MIT, além da informação do valor das perdas rotacionais e da perda suplementar. Estes dados são armazenados e serão utilizados sempre que se encontrar o

motor em questão instalado em uma planta industrial e em operação. Como já mencionado anteriormente, o principal objetivo é a determinação do rendimento do motor sem retirá-lo de operação para levá-lo a um laboratório de ensaios.

4.3 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DO MIT EM CAMPO

Para a determinação do rendimento do MIT em operação são utilizados o modelo do motor obtido a partir de dados de fabricante e as medições da tensão e corrente elétricas de alimentação e velocidade de rotação do eixo. As medidas elétricas são, na maioria das vezes, de fácil obtenção diretamente nos painéis dos motores dispostos em centros de cargas. Para a medição da velocidade de rotação do motor, também não é necessária a retirada do motor do seu local de instalação, sendo necessário que se pare a operação do motor (procedimento intrusivo) para a marcação de pontos de referência para o uso de equipamentos com lâmpada estroboscópica. Outra opção é a utilização de métodos que se baseiam no espectro de frequência da corrente no estator ou do campo magnético externo ao MIT [39] (procedimento não intrusivo).

Dependendo do tipo de carga acionada pelo motor pode-se conseguir dois ou mais conjuntos de medidas para diferentes pontos de operação. Por exemplo, no caso de motores utilizados em agitadores de tanques de produtos, podem ser realizadas medidas com os tanques em diferentes níveis de enchimento. No caso de bombas, pode-se restringir a vazão. No caso de esteiras rolantes, a quantidade de material transportado pode ser diminuída, assim por diante.

A partir das medições realizadas, aplica-se o valor da tensão de alimentação e do escorregamento ao modelo pré-definido do MIT, calculando-se a corrente resultante que é comparada, em módulo e fase, com a corrente também obtida das medições. Como o modelo pré-definido foi obtido para dados de catálogo de um motor de produção em série e nas condições de novo, é de se esperar que os dados não coincidam. Excepcionalmente, caso ocorra a igualdade entre os valores da corrente medida e da corrente simulada pelo modelo, necessita-se apenas calcular o valor do rendimento com o modelo existente para o ponto de operação em que o mesmo se encontra. Em geral, os valores dos parâmetros do modelo deverão ser alterados para buscar minimizar a diferença entre os valores das duas correntes, da medida e da simulada.

O procedimento resume-se a uma busca de valores de parâmetros de forma semelhante ao que fora feito no caso já descrito anteriormente,

também utilizando-se da técnica de algoritmos genéticos. A principal diferença é que a função de avaliação do AG agora é muito menos restritiva. As restrições de relações entre as perdas do motor já não podem ser aplicadas, pois elas podem mudar em função de alterações que o motor possa ter sofrido em sua vida útil. Por outro lado, os valores dos parâmetros do modelo do motor não devem ser muito diferentes daqueles encontrados para os dados de catálogo, e a busca dos novos valores deve se concentrar em torno dos valores já conhecidos. Caso não ocorra convergência para a corrente medida em campo, a área de busca dos novos valores para os parâmetros do modelo deve ir aumentando gradativamente.

No caso de se conseguir realizar medidas em campo em mais de um ponto de operação do motor, a função de avaliação deve considerar a minimização do erro de corrente nos diversos pontos medidos, o que melhora as condições de convergência de resultados, pois diminui o número de soluções possíveis. Além disto, volta-se a utilizar a condição de mínima variação das perdas rotacionais com a variação do carregamento do motor, que já foi destacada anteriormente como um fator determinante para a convergência do algoritmo de busca.

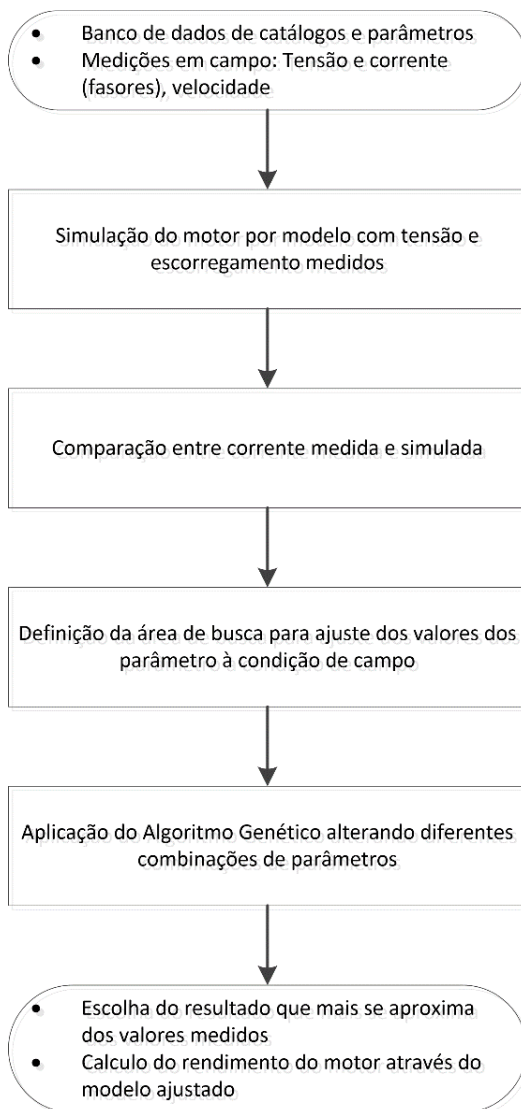
Uma grande vantagem do método proposto é a utilização do modelo alternativo para o motor de indução apresentado na Figura 4.3, sendo o valor de R_{rot} , R_{sup} e R_{load} calculados inicialmente a partir do modelo padrão da norma, obtido com os dados de catálogo, das perdas rotacionais e suplementares conhecidas, e do escorregamento do MIT. Utilizando-se o motor completo e a possibilidade de variação da resistência R_{rot} , para a qual também será feita a busca de um novo valor, a metodologia está considerando que as perdas rotacionais podem ter sido alteradas, uma hipótese bastante provável considerando os desgastes mecânicos do motor com o seu tempo de uso. A mesma consideração pode ser aplicada ao valor da resistência R_{sup} . Porém, para diminuir o número de variáveis a serem determinadas pelo AG e acelerar a convergência, considera-se que o valor deste parâmetro não teve alteração. Para as perdas suplementares isto não implica em grandes diferenças, pois a mesma já é calculada considerando-se a variação do carregamento. Na determinação das perdas suplementares utiliza-se do valor da corrente no rotor. Além disto, o próprio valor original da perda suplementar e de R_{sup} foi calculado por percentual da potência nominal de saída do motor. De qualquer maneira, poderá ficar a critério do operador do sistema considerar ou não a variação de R_{sup} na etapa de campo.

Por fim, destaca-se mais uma vez que o procedimento pode ser interativo, permitindo-se ao operador a escolha de quais parâmetros ele

deve considerar que tiveram variações de valores em relação aos valores dos dados de catálogo. Diversas situações podem ser consideradas, escolhendo-se a solução com a menor diferença entre as correntes medidas e simuladas pelo modelo com os novos valores de parâmetros. Um diagrama que descreve o procedimento da etapa de campo é apresentado na Figura 4.7

Determinado o novo modelo, o valor do rendimento do motor é calculado para o ponto de operação em que ocorreram as medida em campo.

Figura 4.7 – Diagrama representando a etapa de campo da metodologia



5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão apresentados os resultados da aplicação da metodologia proposta nas duas etapas consideradas, a obtenção dos valores dos parâmetros do modelo do MIT a partir de dados de catálogos e o ajuste destes valores a partir de medições em campo para a determinação do seu rendimento.

Para a primeira etapa, o procedimento de teste consistiu em aplicar a metodologia sobre uma série de motores com dados fornecidos por fabricantes e verificar se a função de avaliação do AG é minimizada. Se a função de avaliação do AG foi suficientemente minimizada, o modelo formado pelo conjunto de valores de parâmetros obtidos deve reproduzir adequadamente os dados fornecidos pelo fabricante nos três pontos de operação considerados, incluindo-se rendimento e fator de potência. Nesta etapa foi verificada também a influência nos resultados da utilização de heurísticas relacionadas à distribuição das perdas no MIT.

Uma segunda série de testes teve por objetivo verificar a qualidade do conjunto de valores dos parâmetros obtidos em relação a um conjunto de valores de referência. Para tanto, foram utilizados dados experimentais de motores protótipos disponibilizados pela empresa WEG S.A., os quais foram devidamente ensaiados em um dos laboratórios da empresa, sendo os dados destes ensaios utilizados para obter um modelo de referência para o motor, segundo a norma NBR5383. Estes dados experimentais foram utilizados também como medidas de campo na etapa que objetivou adaptar o modelo de dados de catálogo para a determinação do rendimento do motor em operação.

5.1 DETERMINAÇÃO DOS VALORES DOS PARÂMETROS DO MODELO DO MIT A PARTIR DE DADOS DE CATÁLOGOS

Numa primeira, etapa aplicou-se a metodologia proposta a uma série de motores de diferentes potências de saída e número de polos, apenas utilizando-se os dados de catálogos. O objetivo é demonstrar a convergência e a qualidade dos resultados obtidos com a metodologia e a influência das heurísticas relacionadas à distribuição das perdas. Para esta etapa, os dados de catálogo foram obtidos da página na internet da Siemens S.A. [40]. Os principais dados de catálogo dos motores utilizados são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Dados de catálogo dos motores utilizados na aplicação da metodologia proposta.

Nº	P_n (cv)	p	N (rpm)	I_n (A)	η_{50} (%)	η_{75} (%)	η_{100} (%)	fp_{50}	fp_{75}	fp_{100}	V_l (V)
1	10	2	3.555	14,1	89,1	89,9	89,5	0,81	0,88	0,91	380
2	20	4	1.770	28,4	91,3	91,6	91,0	0,80	0,86	0,87	380
3	30	6	1.178	44,5	91,5	92,2	91,7	0,65	0,76	0,82	380
4	40	8	876	61	92	92	91	0,62	0,74	0,8	380
5	50	2	3.560	69	90,6	92,1	92,4	0,75	0,84	0,87	380
6	60	4	1.780	84	92,6	93,6	93,6	0,71	0,81	0,85	380
7	75	6	1.182	108	93,8	94,1	93,7	0,70	0,79	0,83	380
8	100	8	885	148	93,7	93,9	93,2	0,66	0,76	0,81	380
9	125	2	3.575	166	93,6	94,4	94,5	0,8	0,87	0,89	380
10	150	4	1.789	205	93,5	94,7	95,1	0,69	0,8	0,85	380

O algoritmo foi aplicado nas suas etapas 1 e 2, com e sem a utilização das heurísticas de restrição para a distribuição percentual das perdas. Para cada motor, o algoritmo genético foi reproduzido 30 vezes, observando-se a repetibilidade e a dispersão dos resultados. Como medida geral da qualidade do modelo do motor na reprodução dos seus dados de catálogo foram calculados os valores de *Root Mean Squared Error* (*rRMSE* – onde *r* representa o erro relativo) dado pela equação 5.1.

$$rRMSE(\theta) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{\hat{\theta}_n - \theta_n}{\theta_n} \right)^2} \quad (5.1)$$

θ - é vetor com os parâmetros [η_{50} , η_{75} , η_{100} , fp_{50} , fp_{75} , fp_{100}].

A Tabela 5.2 apresenta, para os motores analisados e para o caso sem heurísticas de distribuição das perdas, os valores dos desvios individuais de cada um dos elementos do vetor θ e o correspondente valor de *rRMSE*, sendo apresentados os casos de valor máximo, mínimo e mediana. Observa-se que o erro percentual obtido para cada elemento do vetor θ foi muito pequeno, ficando sempre abaixo de 1% para todos os motores (melhores casos).

Tabela 5.2: Valores dos desvios do vetor θ e o $rRMSE$ calculado para os modelos dos motores analisados (sem heurística de perdas).

Nº	Resultado	Desvio do valor de referência θ (%)						rRMSE
		η_{50}	η_{75}	η_{100}	fp_{50}	fp_{75}	fp_{100}	
1	Melhor	16,0919E-06	2,84326E-06	15,8780E-15	3,79794E-06	0,180332	12,2003E-15	0,0007512
	Mediana	0,004256	0,000300	0,000610	0,001542	0,184766	0,000107	0,0007564
	Pior	0,077726	0,029833	0,024305	0,047396	0,206071	0,002938	0,0008741
2	Melhor	0,000724	1,87048E-05	4,59011E-09	0,016593015	0,389533118	1,11340E-08	0,0017009
	Mediana	0,299914	0,001796	0,000176	0,112529	0,413086	4,96014E-05	0,0021346
	Pior	0,653965	0,103220	0,000672	0,2444141	0,416294	0,000365	0,0032909
3	Melhor	0,279010	0,002703	0,018167	0,482147	0,796752	0,004400	0,0042181
	Mediana	0,459175	0,051752	0,048145	1,535997	1,217219	0,013940	0,0081421
	Pior	0,630540	0,194466	0,164630	2,338324	1,539533	0,042783	0,0115695
4	Melhor	0,015645	0,002469	0,003315	0,038669	0,001508	0,000893	0,0004517
	Mediana	0,141598	0,016464	0,018642	1,678130	0,727532	0,005284	0,0075155
	Pior	0,249765	0,164855	0,122237	2,974002	1,294326	0,040890	0,0132690
5	Melhor	0,587379	0,137493	0,003628	0,211488	0,131064	0,000885	0,0041581
	Mediana	0,902780	0,338558	0,058801	0,897434	0,244940	0,014413	0,0058001
	Pior	1,443608	0,525460	0,155824	1,260731	0,520486	0,037278	0,0070589

Tabela 5.2 (continuação): Valores dos desvios do vetor θ e o $rRMSE$ calculado para os modelos dos motores analisados (sem heurística de perdas).

Nº	Resultado	Desvio do valor de referência (θ) %						rRMSE
		η_{50}	η_{75}	η_{100}	fp_{50}	fp_{75}	fp_{100}	
6	Melhor	0,691290	0,061932	0,012420	0,224810239	0,036810363	0,003574618	0,0034821
	Mediana	0,861952	0,166250	0,251804	0,402592568	0,10369431	0,070325305	0,0043218
	Pior	1,146657	0,410589	0,336892	0,736658469	0,201540456	0,093245454	0,0052180
7	Melhor	0,399162	0,050799	0,007031	0,202789	0,242943	0,002187112	0,0024440
	Mediana	0,578071	0,219889	0,038700	0,294634	0,277694	0,011267788	0,0030420
	Pior	0,818679	0,345437	0,248603	0,417524	0,348515	0,076754712	0,0041290
8	Melhor	0,172957	12,1E-06	1,27E-06	0,097138	0,483161	0,437E-06	0,0023380
	Mediana	0,403842	0,057742	0,007446	0,228153	0,522667	0,00256	0,0028550
	Pior	0,663065	0,168665	0,094024	0,373473	0,53879	0,032322	0,0037440
9	Melhor	0,097216	0,078654	0,020473163	0,017696	0,256225	0,00418	0,0020800
	Mediana	0,584679	0,247210	0,064811617	0,21548	0,444738	0,013403	0,0031600
	Pior	0,985997	0,424497	0,272394514	0,342642	0,490678	0,043862	0,0050220
10	Melhor	0,693645	0,014807	0,263561	1,872725	0,601555	0,069993	0,0090430
	Mediana	0,797095	0,063910	0,498291	3,171239	1,119514	0,133616	0,0142820
	Pior	1,130232	0,335073	0,673227	3,580475	1,25028	0,150526	0,0159420

Na Tabela 5.3 são apresentados os valores dos parâmetros obtidos para o modelo de melhor rRMSE de cada motor e os valores das suas perdas rotacionais e suplementares. Na Tabela 5.4, são apresentados os valores percentuais de distribuição das perdas para os mesmos modelos de MITs.

Tabela 5.3: Valores dos parâmetros obtidos para o modelo com melhor rRMSE dos motores analisados (sem heurística de perdas).

Nº	R_1 (Ω)	X_1 (Ω)	R_2 (Ω)	X_2 (Ω)	R_c (Ω)	X_m (Ω)	P_{rot} (w)	P_{sup} (w)
1	0,643	1,170	0,2017	1,18	1.429,05	50,12	182,03	132,5
2	0,208	0,866	0,1293	1,26	887,30	27,02	293,94	265,0
3	0,117	0,475	0,0973	0,48	673,96	10,47	296,54	397,4
4	0,094	0,366	0,1037	0,37	785,24	7,12	336,52	529,9
5	0,056	0,289	0,0365	0,31	317,04	8,69	779,14	662,4
6	0,044	0,242	0,0305	0,25	339,84	6,42	539,06	794,8
7	0,032	0,241	0,0318	0,24	417,20	5,05	551,24	993,6
8	0,025	0,167	0,0263	0,19	417,82	3,33	839,96	1.324,8
9	0,018	0,124	0,0093	0,13	213,09	4,27	1.437,25	1.380,0
10	0,015	0,087	0,0069	0,09	163,89	2,51	1.198,28	1.656,0

Tabela 5.4: Distribuição percentual das perdas calculadas com os modelos de melhor rRMSE dos motores analisados (sem heurística de perdas).

Nº	P_{j1} (%)	P_{j2} (%)	P_{fe} (%)	P_{rot} (%)	P_{sup} (%)
1	42,11	11,25	10,22	21,08	15,34
2	34,25	17,79	9,57	20,19	18,20
3	34,98	21,22	9,19	14,79	19,82
4	36,44	28,49	5,34	11,55	18,18
5	26,34	13,91	13,08	25,22	21,44
6	30,03	16,11	11,81	16,99	25,05
7	29,19	22,62	7,76	14,43	26,00
8	30,28	23,91	5,49	15,64	24,67
9	27,24	11,80	10,83	25,57	24,56
10	31,42	11,00	12,47	18,94	26,17

Analisando a Tabela 5.4, observa-se que o percentual de perda rotacional apresentou-se relativamente grande para a maioria dos modelos de motores obtidos. Assim, a metodologia foi aplicada novamente, agora com a utilização de restrições em relação à distribuição das perdas percentuais do motor. Foram utilizadas restrições limitando o valor máximo percentual da perda rotacional. Não é feita restrição para o valor percentual de P_{sup} , que também apresentou valores elevados,

considerando que a mesma é definida, segundo a norma IEEE112, como um valor percentual da potência de saída.

A Tabela 5.5 apresenta para os motores analisados e para o caso com aplicação de heurísticas de distribuição das perdas, os valores dos desvios individuais de cada um dos elementos do vetor θ e o correspondente valor de rRMSE. Na Tabela 5.6, são apresentados os valores percentuais de distribuição das perdas para os modelos com melhor rRMSE.

Uma comparação dos resultados obtidos com e sem a aplicação de heurística pode ser observada nas Figuras 5.1 e 5.2. Na Figura 5.1 os valores de rRMSE do vetor θ obtidos para os 10 motores analisados são apresentados. Observa-se um aumento do erro médio percentual para todos os motores com a aplicação da restrição da perda rotacional. Entretanto, em valores absolutos esses resultados continuam muito bons. Por exemplo, para o motor 10, que foi o caso com o pior resultado, o rRMSE do vetor θ considerando a aplicação de heurística ficou inferior a 0,05.

Na Figura 5.2, observa-se a distribuição de perdas percentuais calculadas com os modelos determinados para os motores. No gráfico são apresentadas duas barras verticais com a distribuição das perdas em cada um dos motores, uma para o caso sem a aplicação de heurísticas e outra com. No caso com heurística, observa-se uma redução do percentual de perdas rotacionais, o que implica em modelos mais condizentes com a realidade.

Tabela 5.5: Valores dos desvios do vetor θ e o $rRMSE$ calculado para os modelos dos motores analisados (com heurística de perdas).

Nº	Resultado	Desvio do valor de referência θ (%)						rRMSE
		η_{50}	η_{75}	η_{100}	fp_{50}	fp_{75}	fp_{100}	
1	Melhor	0,376	0,054	0,266	0,023	0,054	0,042	0,0021271
	Mediana	0,815	0,283	0,194	0,287	0,152	0,033	0,0038486
	Pior	1,072	0,355	0,252	0,364	0,146	0,043	0,0049914
2	Melhor	0,086	0,149	0,008	0,490	0,237	0,002	0,0023294
	Mediana	0,014	0,054	0,027	0,699	0,152	0,008	0,0029301
	Pior	0,004	0,092	0,005	0,840	0,101	0,002	0,0034759
3	Melhor	1,020	0,0007	0,615	1,091	1,257	0,199	0,0083950
	Mediana	1,078	0,1138	0,475	1,450	1,362	0,151	0,0094704
	Pior	0,183	0,5890	1,069	12,254	5,641	0,350	0,0553222
4	Melhor	0,693	0,095	0,301	0,108	0,2274	0,107	0,0033052
	Mediana	0,584	0,034	0,318	0,561	0,4104	0,112	0,0039561
	Pior	0,573	0,041	0,322	1,224	0,6744	0,104	0,0063212
5	Melhor	0,908	0,086	0,586	1,115	0,074	0,143	0,0063847
	Mediana	0,909	0,024	0,658	1,248	0,005	0,160	0,0068863
	Pior	1,559	0,401	0,491	0,932	0,120	0,120	0,0078845

Tabela 5.5 (continuação): Valores dos desvios do vetor θ e o $rRMSE$ calculado para os modelos dos motores analisados (com heurística de perdas).

Nº	Resultado	Desvio do valor de referência (θ) %						rRMSE
		η_{50}	η_{75}	η_{100}	fp_{50}	fp_{75}	fp_{100}	
6	Melhor	0,973	0,002	0,707	0,369	0,0002	0,196	0,005196832
	Mediana	1,213	0,181	0,538	0,152	0,1026	0,149	0,005550309
	Pior	1,541	0,453	0,319	0,073	0,1648	0,086	0,006736966
7	Melhor	0,770	0,173	0,305	0,402	0,321	0,093	0,004059862
	Mediana	0,930	0,012	0,749	0,473	0,421	0,229	0,00559513
	Pior	1,039	0,017	0,921	1,462	1,228	0,261	0,009698392
8	Melhor	0,809	0,052	0,376	0,458	0,566	0,129	0,004733894
	Mediana	0,829	0,008	0,476	0,463	0,593	0,162	0,005013011
	Pior	0,984	0,009	0,606	0,553	0,609	0,208	0,00585186
9	Melhor	0,573	0,012	0,553	0,271	0,203	0,114	0,003565075
	Mediana	1,053	0,217	0,501	0,318	0,167	0,104	0,005078648
	Pior	1,127	0,150	0,725	0,541	0,046	0,150	0,005966706
10	Melhor	1,106	0,0005	0,898	10,119	3,765	0,166	0,04446677
	Mediana	0,672	0,0973	0,955	12,032	4,481	0,264	0,052644802
	Pior	1,008	0,0203	0,957	14,056	5,255	0,263	0,061535447

Tabela 5.6: Distribuição percentual das perdas calculadas com os modelos de melhor rRMSE dos motores analisados (com heurística de perdas).

N°	$P_{j1} (\%)$	$P_{j2} (\%)$	$P_{fe} (\%)$	$P_{rot} (\%)$	$P_{sup} (\%)$
1	47,50	10,85	15,85	10,83	14,96
2	36,45	17,74	11,14	16,45	18,22
3	45,70	20,00	8,21	7,28	18,80
4	44,62	27,43	4,91	5,43	17,61
5	34,50	13,05	19,48	12,66	20,31
6	39,34	15,16	12,61	9,20	23,69
7	35,24	22,12	8,33	8,78	25,53
8	42,88	22,50	5,87	5,38	23,37
9	37,56	11,15	16,77	11,12	23,40
10	38,06	10,28	17,08	10,01	24,56

Figura 5.1 - Valores rRMSE dos melhores conjunto de parâmetros obtidos a partir de dados de catálogo (com e sem a utilização de heurística de perdas).

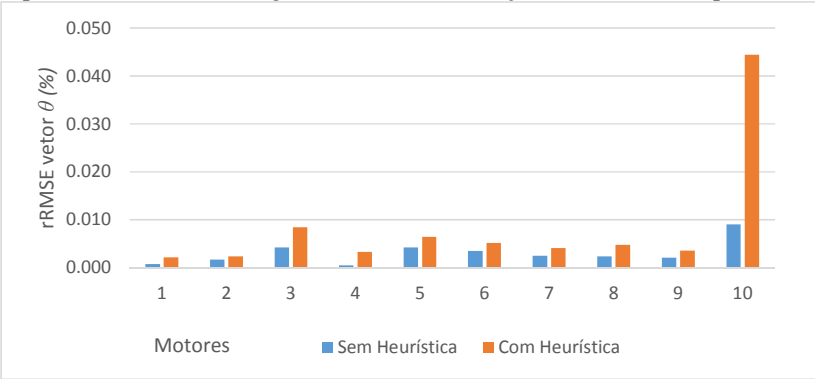
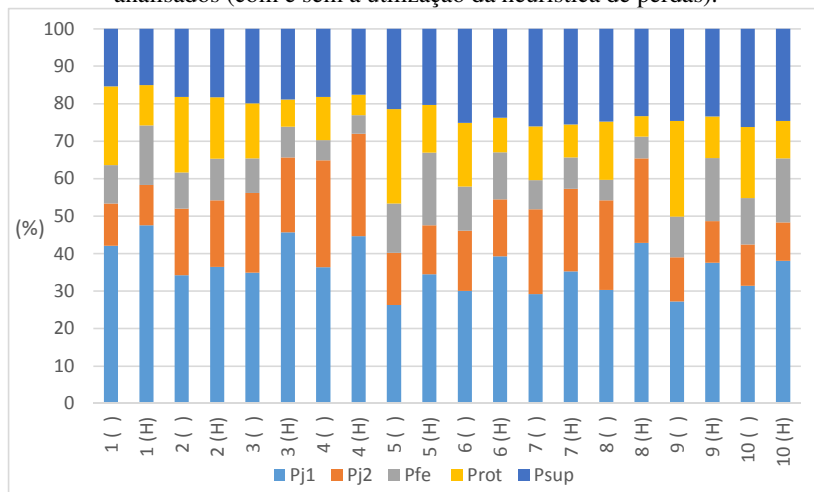


Figura 5.2 - Distribuição percentual das perdas nos modelos dos motores analisados (com e sem a utilização da heurística de perdas).



5.2 UMA MEDIDA DA QUALIDADE DOS VALORES DOS PARÂMETROS DO MODELO DO MIT OBTIDOS A PARTIR DOS DADOS DE CATÁLOGO

O principal objetivo da metodologia proposta é a determinação de um modelo para o MIT, com os valores de parâmetros ajustados através de medidas realizadas como motor em operação, para a determinação do seu rendimento. A comprovação de resultados é obtida se o rendimento final encontrado é condizente com aquele que é determinado em laboratório, utilizando-se a medição direta da potência de entrada e a potência de saída no eixo do motor. A avaliação dos valores obtidos para os parâmetros do modelo em comparação com valores determinados a partir de dados de projeto ou de experimentos de laboratório fornece uma medida da qualidade dos resultados atingidos.

Para realizar a avaliação da qualidade dos valores de parâmetros determinados a partir dos dados de catálogos foram utilizados como referência os valores de parâmetros determinados a partir da norma IEEE112 (métodos F e B) utilizando-se dados experimentais obtidos na empresa WEG S.A. para um conjunto de motores protótipos.

Os dados de catálogo dos motores fornecidos pela WEG são apresentados na Tabela 5.7. Os dados experimentais ensaiados na

empresa WEG são apresentados na Tabela 5.8 que contém também os valores do conjunto de perdas no motor, sendo as perdas suplementares calculadas por exclusão. Os valores dos parâmetros de referência obtidos de acordo com a norma IEEE112 são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.7: Dados de catálogo dos motores com resultados experimentais ensaiados na empresa WEG.

Motor	P_n (cv)	p	N (rpm)	I_n (A)	η_{50} (%)	η_{75} (%)	η_{100} (%)	fp_{50}	fp_{75}	fp_{100}	V_l (V)
A	10	4	1.760	11,80	90	90,8	91,0	0,66	0,78	0,84	480
B	25	2	3.530	35,30	91	91,5	91,5	0,74	0,83	0,87	380
C	100	6	1.185	126,00	93,9	94,2	94,4	0,70	0,80	0,83	440

Tabela 5.8: Dados experimentais de motores ensaiados na empresa WEG.

Motor	A	B	C
$RPM_{100\%}$	1761,8	3538,4	1185,0
η_{100} (%)	90,86	91,78	94,46
η_{75} (%)	91,72	92,32	94,97
η_{50} (%)	91,60	91,91	94,83
fp_{100}	0,86	0,88	0,81
fp_{75}	0,81	0,84	0,78
fp_{50}	0,70	0,75	0,68
P_{j1} (W)	370,87	643,61	2117,93
P_{j1} (%)	49,18	38,86	48,17
P_{j2} (W)	165,73	331,39	968,82
P_{j2} (%)	21,98	20,01	22,03
P_{fe} (W)	130,16	246,26	631,85
P_{fe} (%)	17,26	14,87	14,37
P_{rot} (W)	35,53	239,30	471,46
P_{rot} (%)	4,71	14,45	10,72
P_{sup} (W)	51,81	195,81	206,55
P_{sup} (%)	6,87	11,82	4,70

Tabela 5.9: Parâmetros de referência para os motores ensaiados na empresa WEG.

Motor	A	B	C
R_1 (Ω)	0,9101	0,1747	0,0425
X_1 (Ω)	2,358	0,6338	0,2856
R_2 (Ω)	0,5438	0,1129	0,02544
X_2 (Ω)	3,519	0,9459	0,4263
R_c (Ω)	1404	444,2	247,8
X_m (Ω)	66,42	21,06	5,946

A partir dos dados de catálogo foram determinados os valores dos parâmetros do modelo, incluindo-se restrições heurísticas dos percentuais das perdas. Para cada motor, o algoritmo genético foi reproduzido 30 vezes. Os resultados de rRMSE e desvio percentual em relação ao vetor θ (dados de catálogo) são apresentados na Tabela 5.10. A definição de quais valores são os melhores e piores resultados é referenciada ao rRMSE.

A Tabela 5.11 apresenta o rRMSE obtido de maneira análoga a equação 5.1, aplicada ao vetor $\beta = [R_1, X_1, R_2, X_2, R_f, X_m]$, sendo apresentados os desvios percentuais individuais de cada parâmetro do modelo do motor.

É importante destacar que os valores de referência dos parâmetros foram obtidos segundo a norma IEEE 112, onde os parâmetros X_1 e X_2 são diretamente relacionados por uma constante e o valor da perda suplementar foi obtido experimentalmente. Na metodologia proposta neste trabalho os valores de X_1 e X_2 não são diretamente relacionados, e o valor da perda suplementar é definido por um percentual da potência de saída, procedimento também definido em norma. Em todos os motores analisados há uma grande discrepância nos valores das perdas suplementares nos dois casos, sendo que as perdas obtidas experimentalmente são bem inferiores às definidas por percentagem estipulada por norma. Estas diferenças nas duas metodologias de determinação dos valores dos parâmetros não garantem um termo final na avaliação dos resultados obtidos para os valores dos parâmetros, ou seja, não podemos garantir que os valores ideais para o modelo seja o obtido pela norma pois a mesma também realiza aproximações. Principalmente, em função da multiplicidade de conjuntos de valores de parâmetros que atendem as equações do circuito equivalente do motor e os dados de catálogo. Por outro lado, os resultados encontrados pelas duas metodologias apresentam erros relativos entre os valores de parâmetros de no máximo 52 % para R_f e no mínimo 6,5 % para R_2 , o que demonstra a convergência para uma mesma região de soluções. É importante destacar que em termos absolutos um erro de 52% parece significativo. Mas além das diferenças mencionadas em relação as perdas suplementares obtidas por medição, este erro ocorreu apenas para um parâmetro, R_f , o qual tem uma ampla faixa dinâmica de valores.

Tabela 5.10: Valores dos desvios do vetor θ e o $rRMSE$ calculado para os modelos dos motores fornecidos pela WEG.

Motor	Resultado	Desvio do valor de referência θ (%)						rRMSE
		η_{50}	η_{75}	η_{100}	fp_{50}	fp_{75}	fp_{100}	
A	Melhor	0,574	0,306	0,463	0,400	0,167	0,123	0,003741641
	Mediana	0,759	0,336	0,560	0,227	0,147	0,164	0,004297046
	Pior	1,125	0,732	0,124	0,067	0,016	0,011	0,005510634
B	Melhor	1,046	0,634	0,087	0,375	0,0620	0,0133	0,005241305
	Mediana	1,127	0,796	0,031	0,494	0,005	0,0042	0,00612176
	Pior	1,510	0,934	0,001	0,682	0,045	0,0005	0,0077693
C	Melhor	0,373	0,187	0,567	0,242	0,697	0,173	0,004223395
	Mediana	0,582	0,313	0,479	0,022	0,784	0,149	0,005069046
	Pior	0,156	0,048	0,675	1,457	0,212	0,210	0,006701644

Tabela 5.11: Valores dos desvios do vetor β e o $rRMSE$ calculado para os modelos dos motores fornecidos pela WEG.

Motor	Resultado	Desvio do valor de referência β (%)						rRMSE
		R_1	X_1	R_2	X_2	R_f	X_m	
A	Melhor	30,062	43,937	8,138	43,930	51,518	24,089	36,662
	Mediana	29,189	44,073	8,250	44,066	59,452	24,256	38,804
	Pior	29,636	43,980	8,230	43,974	75,176	24,164	42,913
B	Melhor	11,520	32,017	12,665	32,012	24,469	23,189	24,081
	Mediana	4,236	32,323	12,362	32,318	45,663	23,550	28,188
	Pior	1,365	32,172	12,192	32,167	63,434	23,590	33,667
C	Melhor	31,886	26,962	6,532	26,967	39,921	10,529	26,514
	Mediana	31,991	26,869	6,287	26,875	51,491	10,269	29,627
	Pior	31,972	29,800	6,837	29,805	55,629	12,259	31,859

5.3 AJUSTANDO O MODELO PARA MEDIDAS EM CAMPO E A DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DO MOTOR NO SEU PONTO DE OPERAÇÃO

Na metodologia proposta os valores dos parâmetros do modelo de um MIT obtido a partir de dados de catálogo ficam disponíveis num banco de dados de motores para utilização na determinação do rendimento do motor em campo. Neste banco de dados são armazenados os valores dos parâmetros e das perdas rotacionais e suplementares calculadas, além de outros dados do motor. Com medidas realizadas com o motor em operação em campo, o algoritmo genético é aplicado novamente para alterar os valores dos parâmetros de maneira que o mesmo venha a reproduzir estas medidas. O modelo utilizado nesta etapa é o modelo que considera as resistências P_{rot} e P_{sup} .

Para testar a aplicação da metodologia foram utilizados os motores apresentados na seção anterior, cujas medidas experimentais em vários pontos de operação estão disponíveis. Mesmo se tratando de motores novos, suas características individuais fazem com que os mesmos tenham valores de parâmetros dos seus modelos diferentes daqueles obtidos para os dados de catálogo. Assim, será realizado o ajuste destes valores de parâmetros sendo comparados os rendimentos obtidos pelo novo modelo e experimentalmente.

Adicionalmente aos motores já apresentados na seção 5.2, foram acrescentados os dados e medições de outro motor disponibilizado pela WEG S.A. com data de fabricação de 2008, que em função do tempo e condições de uso, já não deveria apresentar as características operacionais originais. Os dados de catálogo deste outro motor são apresentados na Tabela 5.12. Para este motor foi aplicado o algoritmo para a determinação dos valores dos parâmetros do modelo a partir de dados de catálogo. Os valores de parâmetros obtidos com os dados de catálogo do conjunto de motores, já considerando o modelo com R_{rot} e R_{sup} , são apresentados na Tabela 5.13.

As medidas realizadas no conjunto de motores são apresentadas na Tabela 5.14. Somente as medidas de tensão, corrente e escorregamento são utilizadas para adaptação dos valores dos modelos dos motores, sendo considerada a utilização de um e dois pontos de operação. As demais medidas realizadas em laboratório servem para a validação dos resultados.

Tabela 5.12: Dados de catálogo do 4º motor usado (motor antigo) na validação da metodologia proposta.

Motor	P_n (cv)	p	n (rpm)	I_n (A)	η_{50} (%)	η_{75} (%)	η_{100} (%)	fp_{50}	fp_{75}	fp_{100}	V_l (V)
D	15	4	1.755	21,7	90,5	91,5	91,7	0,67	0,78	0,84	380

Tabela 5.13: Valores dos parâmetros dos modelos obtidos dos dados de catálogos dos motores utilizados na validação da metodologia.

Motor	R_1 (Ω)	X_1 (Ω)	R_2 (Ω)	X_2 (Ω)	R_f (Ω)	X_m (Ω)	R_{rot} (Ω)	R_{sup} (Ω)
A	0,644	1,319	0,589	1,968	2.238,71	50,31	1.779,45	0,450
B	0,155	0,431	0,127	0,643	552,89	16,18	557,97	0,110
C	0,0289	0,199	0,027	0,297	366,71	5,18	1.779,45	0,038
D	0,2132	0,910	0,274	0,914	696,93	23,10	2.733,22	0,188

Tabela 5.14: Valores das medidas experimentais realizadas nos motores utilizados na validação da metodologia.

Motor	Tensão (V)	I (A)	$\cos(\phi)$	$P_{out}/$ P_{100}	P_{ab} (W)	P_{out} (W)	η (%)
A	480,5	5,41	0,48	0,252	2.164	1.888,88	87,00
	479,3	7,03	0,71	0,505	4.119	3.769,04	91,39
	479,6	9,15	0,81	0,752	6.122	5.617,24	91,71
	479,0	11,60	0,86	1,000	8.206	7.463,45	90,92
	480,7	14,20	0,88	1,243	10.339	9.276,18	89,72
	480,7	17,10	0,89	1,490	12.605	11.118,79	88,22
B	380,6	14,62	0,55	0,253	5.309	4.711,18	88,34
	380,6	20,45	0,76	0,504	10.207	9.355,94	91,48
	380,3	27,49	0,84	0,752	15.203	13.960,18	91,72
	380,4	35,23	0,87	1,000	20.260	18.547,74	91,49
	381,0	43,30	0,89	1,245	25.404	23.080,36	90,82
	380,7	51,89	0,89	1,488	30.624	27.525,51	89,87
C	439,1	57,35	0,50	0,261	21.450	19.657,06	91,35
	440,3	76,14	0,70	0,5021	39.940	37.792,19	94,47
	440,3	101,43	0,77	0,752	59.543	56.540,38	94,85
	441,1	128,86	0,81	1,000	79.490	75.172,52	94,49
	439,7	160,28	0,82	1,250	100.295	93.975,39	93,64
	441,2	192,41	0,82	1,491	120.737	112.045,10	92,75
D	380,6	10,77	0,46	0,252	3.213,5	2.782,90	86,54
	380,1	13,59	0,67	0,504	6.124,5	5.573,30	90,93
	381,0	17,38	0,79	0,753	9.107,3	8.314,96	91,35
	380,1	21,79	0,85	1,000	12.184	11.026,52	90,67
	381,6	26,58	0,88	1,248	15.387	13.740,60	89,59
	380,1	31,60	0,89	1,479	18.514	16.273,81	88,26

Para cada motor e ponto experimental disponível foram determinados novos valores para os parâmetros do modelo considerando a minimização da diferença entre a corrente medida e a estimada. Os valores de rendimento, calculados com o modelo determinado, são apresentados na Tabela 5.15 juntamente com o valor do rendimento medido experimentalmente, no mesmo ponto de operação. O algoritmo foi executado 10 vezes para cada ponto de operação e para cada motor, sendo apresentado o melhor resultado em relação ao erro de corrente. O erro entre o rendimento estimado e experimental somente é determinado para motores que tenham sido ensaiados, justamente o procedimento que a metodologia proposta busca substituir.

Tabela 5.15: Diferença de rendimento medido e calculado pelo modelo ajustado.

Motor	$P_{out}/P_{100} \approx$ (%)	$\eta_{experimental}$ (%)	$\eta_{calculado}$ (%)	Erro η (%)
A	25	87,00	86,28	-0,73
	50	91,39	90,78	-0,61
	75	91,71	91,30	-0,41
	100	90,92	90,72	-0,20
	125	89,72	89,40	-0,32
	150	88,22	87,95	-0,27
B	25	88,34	88,15	-0,19
	50	91,48	91,84	0,36
	75	91,72	91,97	0,24
	100	91,49	91,52	0,02
	125	90,82	90,50	-0,31
	150	89,87	89,43	-0,44
C	25	91,35	91,96	0,61
	50	94,47	94,19	-0,27
	75	94,85	94,37	-0,48
	100	94,49	93,84	-0,65
	125	93,64	92,81	-0,83
	150	92,75	91,57	-1,18
D	25	86,54	89,52	2,98
	50	90,93	92,46	1,53
	75	91,35	92,55	1,21
	100	90,67	91,67	1,00
	125	89,59	90,47	0,88
	150	88,26	89,34	1,08

Nas Figuras 5.3 a 5.6, são apresentados os gráficos com os resultado para os motores A a D, respectivamente.

Figura 5.3 - Rendimento experimental e calculado com o modelo ajustado para o motor A

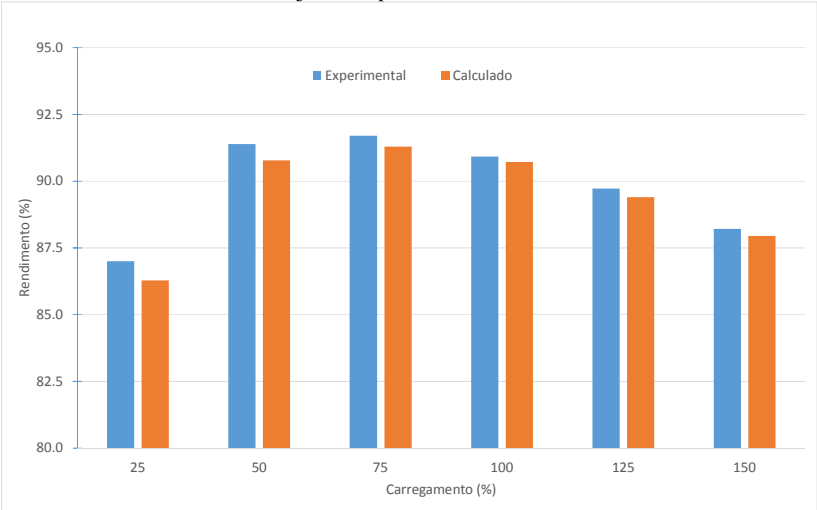


Figura 5.4 - Rendimento experimental e calculado com o modelo ajustado para o motor B

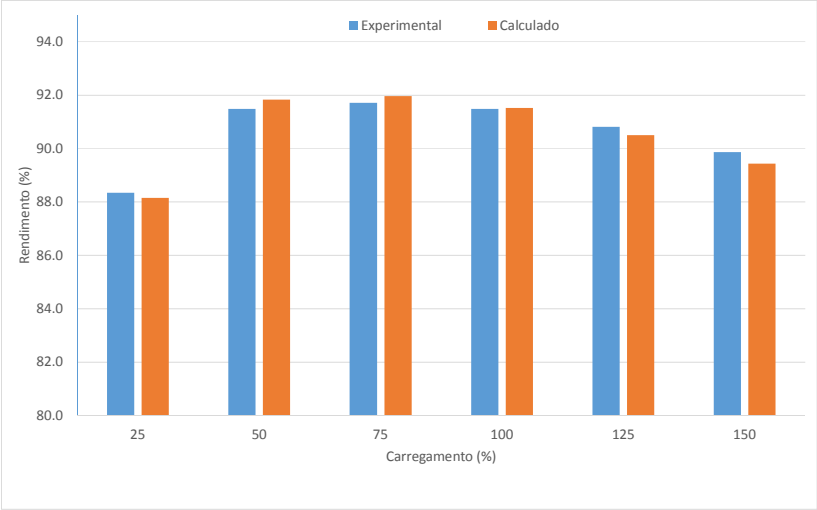


Figura 5.5 - Rendimento experimental e calculado com o modelo ajustado para o motor C

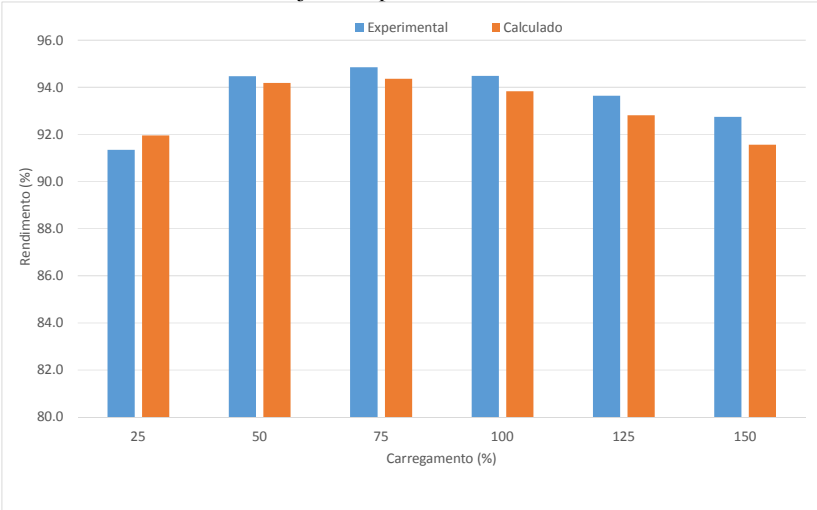
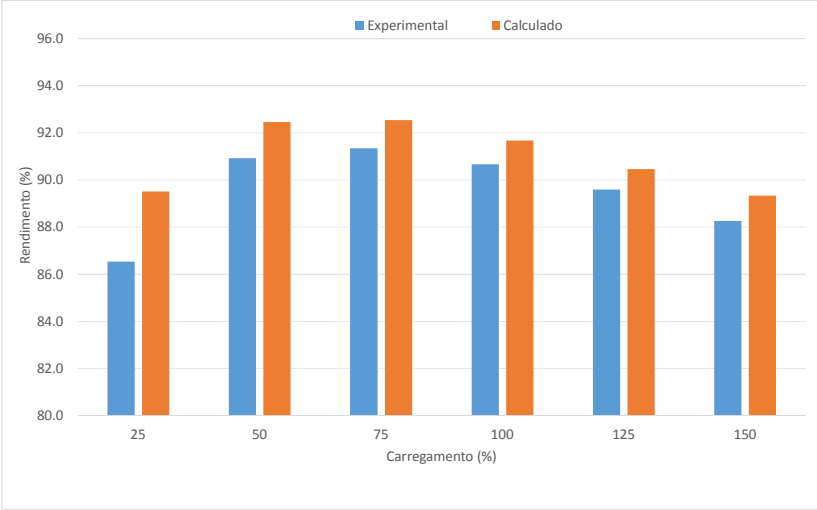


Figura 5.6 - Rendimento experimental e calculado com o modelo ajustado para o motor D



Um segundo teste considera que tenham sido realizadas medidas em campo em dois pontos de operação do motor e a metodologia proposta realiza o ajuste dos valores dos parâmetros do seu modelo de forma a

minimizar a diferença entre as correntes medidas e as simuladas simultaneamente nestes dois pontos. Neste caso, a única alteração necessária é na função de avaliação do algoritmo genético, que agora passa a considerar os dois erros de corrente.

Para os mesmo motores analisados neste capítulo apresenta-se na Tabela 5.16 valores de rRMSE dos vetores θ e β considerando os dois pontos de carregamento indicados. O vetor θ corresponde aos valores de corrente calculada e experimental nos pontos 1 e 2 ($\theta = [I_{1_carga1}, I_{1_carga2}]$) e o vetor β corresponde aos valores de rendimento calculados com o modelo e obtidos em laboratório nos mesmos pontos de carga ($\beta = [\eta_{carga1}, \eta_{carga2}]$). O cálculo de rRMSE foi apresentado na equação 5.1. Os resultados apresentados foram os melhores obtidos para os valores rRMSE do vetor θ .

Tabela 5.16: Diferença de rendimento medido e calculado pelo modelo ajustado considerando dois pontos de medição.

Motor	Pontos de carga \approx (%)	rRMSE vetor θ	rRMSE vetor β	Maior erro de η (%) nos dois pontos de operação
A	75-100	0,001952052	0,327083153	0,380377839
	75-125	0,03600833	3,10049275	3,436743641
	100-125	0,003894976	0,152134781	0,183850377
	100-150	0,08261112	2,033119206	2,221964451
	125-150	0,017861739	0,052788575	0,052465763
B	75-100	0,000237713	0,420913847	0,515962565
	75-125	0,021601246	3,129111906	3,089085638
	100-125	0,006380137	0,158075682	0,176212858
	100-150	0,074125385	1,931840064	1,8471537
	125-150	0,004913693	0,249706395	0,3150136
C	75-100	0,01010187	0,701443146	0,756215506
	75-125	0,164843927	0,222918188	0,297529885
	100-125	0,056492444	0,802054925	0,77636855
	100-150	0,175663741	0,204134722	0,23853447
	125-150	0,022004653	0,998075252	1,009042112
D	75-100	0,000159779	1,361781964	1,249321624
	75-125	0,023541045	4,029340577	4,045207985
	100-125	0,009308006	1,403833278	1,272337455
	100-150	0,050107236	3,340502146	3,280647216
	125-150	0,011931196	1,824867473	1,658977243

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na primeira parte deste capítulo a metodologia para a determinação dos valores dos parâmetros do modelo do motor a partir de dados de catálogo foi testada em 10 motores de linha de diferentes potências e números de polos. Ficou demonstrado que os modelos estabelecidos para cada motor conseguem reproduzir os dados de catálogo com um mínimo de erro ($rRMSE = 0,002$), mesmo quando restrições relacionadas à distribuição das perdas percentuais no motor são estabelecidas, o que resulta em modelos com valores de parâmetros mais condizentes com a realidade. Com esta metodologia, pode-se trabalhar na criação de um banco de dados de modelos de motores comerciais de diferentes fabricantes, os quais serão utilizados em campo para a determinação do rendimento deste motor em um determinado ponto de operação.

Apesar do objetivo final da determinação dos valores dos parâmetros do modelo do MIT ser a estimação do rendimento de motores em campo e dada a multiplicidade de conjuntos de valores que podem satisfazer as equações estabelecidas para o mesmo, buscou-se avaliar o quanto os resultados obtidos com a metodologia convergem para valores de parâmetros tidos como valores “verdadeiros”. O problema neste caso é o estabelecimento da referência para a avaliação dos valores obtidos. O procedimento de norma que levanta os parâmetros do modelo do MIT faz uma série de considerações e simplificações diferentes das utilizadas na metodologia proposta. Um exemplo disto está na relação direta entre X_1 e X_2 e na forma de determinação das perdas suplementares. Apesar destas diferenças verificou-se, um desvio máximo de 50 % em apenas um dos parâmetros de um dos motores analisados, demonstrando que, além de atender as especificações dos dados de catálogo, a metodologia leva a solução para uma mesma região do espaço onde se encontra a solução obtida pela metodologia experimental normatizada. Destaca-se mais uma vez que o parâmetro tem uma ampla faixa dinâmica pois tem pouca influência sobre os valores simulados pelo modelo dos dados constantes no catálogo.

Para testar o desempenho da metodologia na determinação do rendimento de motores em campo, considerou-se as medidas experimentais de tensão, corrente e velocidade no eixo do motor, como se tivessem sido obtidas em uma instalação industrial, sendo estas utilizadas para ajustar os valores dos parâmetros do modelo obtido por dados de catálogos às condições de operação específicas. As demais medidas experimentais são utilizadas para comparar o rendimento obtido

através do modelo ajustado com o rendimento obtido por medição direta das potências de entrada e saída no eixo do motor. Os resultados obtidos com a utilização de um ponto de operação foram excelentes, com diferenças entre os valores de rendimento estimado e de rendimento calculado para o motor em sua maior parte inferiores a 1 %.

Mesmo para pontos de operação com carregamento de 25 % as diferenças foram relativamente pequenas (menores que 3%). Destaca-se que com este carregamento, sob a ótica da eficiência energética, é recomendada a substituição do motor por um de menor potência nominal.

Para o caso de se utilizar dois pontos de operação para o encontro dos valores dos parâmetros do modelo, os melhores resultados em relação ao erro de rendimento ocorreram quando os pontos de carregamentos utilizados foram próximos, como por exemplo, o ponto de 100 % e 125 % de carregamento. Quando os pontos utilizados são relativamente distantes 50 % de carga (100 % - 150 % e 75 % - 125 %), os resultados chegaram a ser piores, em alguns casos, do que os resultados obtidos com a utilização de um único ponto de medição. Uma possível causa para estes resultados é a variação paramétrica que o modelo possa sofrer em função do seu carregamento. Além disto, possíveis erros de medição acumulados podem levar a uma situação de não se encontrar um conjunto de parâmetros que satisfaça os dados medidos nos dois pontos de operação. Na Tabela 5.16 de resultados foi apresentado além dos valores de rRMSE de correntes e rendimento nos dois pontos experimentais escolhidos, o valor do pior erro de rendimento obtidos entre esses dois pontos.

De forma geral os resultados apresentados nos três experimentos apresentados demonstram a capacidade da metodologia proposta para a estimação do rendimento do motor em operação, desde a determinação do modelo a partir de dados de catálogo, até no ajuste deste modelo para contemplar o motor em operação.

6. CONCLUSÃO

O objetivo principal desta tese foi desenvolver uma metodologia para a determinação do rendimento de motores em operação em indústrias, considerando o mínimo de intrusão no processo. O escopo último do trabalho foi de possibilitar uma ferramenta para avaliação mais precisa de ganhos energéticos e econômicos com a substituição por motores mais eficientes. Dentre os métodos discutidos na literatura para este objetivo, destacam-se os baseados na determinação do circuito equivalente do motor e a utilização da técnica de algoritmos genéticos para a determinação dos valores de seus parâmetros. Não se encontrou outro método existente até então que considera a determinação de todos os valores de todos parâmetros do circuito, fazendo uso de relações estabelecidas entre eles para a diminuição do número de variáveis a serem determinadas. Outro ponto importante observado nos trabalhos publicados analisados é a realização da medição da resistência do estator em campo, o que é considerado um procedimento extremamente intrusivo para ser aplicado ao conjunto de motores de uma planta industrial.

A contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para a determinação dos valores dos parâmetros do modelo do MIT realizando apenas medidas elétricas e de velocidade, procedimento considerado simples e de fácil aprovação pelas equipes técnicas e de segurança de empresas envolvidas numa avaliação de eficiência energética, afim de se estimar o rendimento do motor em questão. A técnica de busca dos valores empregada é a de algoritmos genéticos, considerando a determinação prévia dos circuitos equivalentes dos motores na condição de operação nominal a partir dos dados fornecidos pelos fabricantes.

A determinação do modelo do MIT a partir de dados fornecidos por fabricantes em catálogos de equipamentos pode ser considerada uma área de pesquisa paralela. Com este modelo tem-se um detalhamento do funcionamento do motor em qualquer ponto de operação além daqueles já apresentados nos próprios catálogos. Neste trabalho, o modelo do MIT obtido para operação nominal e nas condições em que sai de fábrica serve de ponto de partida para a determinação do rendimento do motor em operação. A aplicação da técnica de algoritmos genéticos para a determinação dos valores dos parâmetros do modelo do MIT em operação tem a sua área de busca definida dentro de uma região de valores próxima aos dos obtidos para as condições nominais.

A utilização da técnica de algoritmos genéticos, tanto para a etapa de formação de banco de dados, como na etapa de ajuste do modelo para determinar o rendimento do motor em operação, se deu em função da natureza de múltiplas soluções do problema. Não foi objetivo desta tese estudar qual a melhor técnica de busca de valores de parâmetros e otimização. A escolha de algoritmos genéticos se deu por se tratar de uma ferramenta de uso consagrado considerada confiável para se atingir o objetivo proposto.

Em relação ao modelo por fase em regime permanente do motor, duas versões foram consideradas. Para a etapa de dados de catálogo foi utilizado o modelo tradicional, obtendo-se ao final da aplicação da metodologia um conjunto com valores dos seus 6 parâmetros e as perdas rotacionais e suplementares, que não estão nele representadas. Um modelo com 8 parâmetros é utilizado na etapa de campo, permitindo que se considere a variação das perdas rotacionais com o tempo de uso e o desgaste do motor em operação, assim como a perda suplementar que passa a ser proporcional ao carregamento.

Uma significativa contribuição do trabalho foi a adoção de heurísticas baseadas na distribuição percentual das perdas dos motores para complementar o conjunto de equações aplicadas no algoritmo de busca de parâmetros. A aplicação direta do conhecimento de que as perdas rotacionais são praticamente constantes no motor teve um grande impacto na convergência dos resultados.

Os resultados apresentados no Capítulo 5 mostram que os objetivos foram atingidos. Porém, indicam que dentro de um limite de erro considerado aceitável para a função de avaliação minimizada, a solução para este tipo de sistema não é única. A própria natureza do algoritmo genético, por ser estocástica, leva a uma solução diferente cada vez que o mesmo é executado. Neste contexto, torna-se necessário um procedimento iterativo e interativo para a determinação da melhor solução dentro do critério de erro estabelecido. Considerando que a determinação dos valores dos parâmetros a partir dos dados de placa é um procedimento realizado antes da etapa de medições em campo, tem-se a possibilidade de realizar várias iterações. Além disto, com a adoção de informações heurísticas no algoritmo, descarta-se as soluções não reais. Assim, os resultados obtidos em relação à minimização do erro das grandezas de interesse foram satisfatórios. Em relação à determinação do rendimento, a diferença entre os valores estimados pelo modelo e medidos diretamente mostram que a metodologia pode ser utilizada com segurança em procedimento de avaliação energética de MITs.

Dada a complexidade do trabalho e a variedade de fatores que podem influenciar nos resultados do modelo obtido não é pretensão desta tese pôr termo ao tema, servindo na verdade como mais outro ponto de partida para uma variedade de novas pesquisas que podem ser desenvolvidas. Como sugestões para novos trabalhos se pode destacar:

- Testar novos métodos de busca de parâmetros;
- Aplicar a metodologia a uma série maior de motores dada a disponibilidade de uma bancada de ensaios na UFSC, que se encontra em instalação atualmente;
- Estudar critério de parada para o algoritmo genético de forma a minimizar o tempo de determinação do rendimento do motor, principalmente para o caso da etapa em campo;
- Realizar trabalhos estatísticos de distribuição das perdas e buscar determinar quais tipos de perdas em motores possuem maior variação com o tempo de uso;
- Desenvolver uma metodologia de alteração sequencial e individual dos parâmetros do modelo, buscando melhorar os resultados obtidos para o erro do rendimento.
- Analisar os casos aplicados a dois pontos de operação com grande diferença de carregamento a fim de considerar a variação paramétrica do modelo em diferentes pontos de carga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. Lu, T. Habetler, and R. Harley, “A survey of efficiency estimation methods of in-service induction motors with considerations of condition monitoring requirements,” in *Electric Machines and Drives*, 2005 IEEE International Conference on, may 2005, pp. 1365-1372.
- [2] B. Lu, T. Habetler and R. Harley, “A survey of efficiency-estimation methods for in-service induction motors,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, no. 4, pp. 924-933, Jul. 2006.
- [3] J. Holmquist, J. Rooks, and M. Richter, “Practical approach for determining motor efficiency in the field using calculated and measured values,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 1, pp. 242-248, Jan. 2003. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1268202>
- [4] H. Toliyat, E. Levi, and M. Raina, “A review of RFO induction motor parameter estimation techniques,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 18, no. 2, pp. 271-283, Jun. 2003. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1201100>
- [5] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR5383: Máquinas Elétricas Girantes Parte 1: Motores de indução trifásicos - Ensaaios. Rio de Janeiro, 2002.
- [6] Moreira, H. J. F. Guia Operacional de Motores Elétricos. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS/PROCEL; CEPEL/CATE, 2000.
- [7] I. L. Kosow, *Electric machinery and Transformers*, Prentice-Hall, p. 461, 1991.
- [8] S. Corino, E. Romero, L. F. Mantilla, How the efficiency of induction motor is measured, Department of Electrical Engineering and Energy, ETSII y T. Universidad de Cantabria (2008).

- [9] W. Cao, "Comparison of IEEE 112 and new IEC standard 60034-2-1," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 3, pp.802-808, sept. 2009.
- [10] R. A. d. Castro, "Análise de viabilidade de troca de motores elétricos superdimensionados e a influência da energia reativa," Ph.D. dissertation, Universidade Estadual de Campinas. SP, 2008.
- [11] P. G. Cummings, W. D. Bowers, and W. J. Martiny, "Induction Motor Efficiency Test Methods," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-17, no. 3, pp. 253-272, May 1981. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4503940>
- [12] A. de Almeida, F. Ferreira, J. Busch, and P. Angers, "Comparative analysis of IEEE 112-B and IEC 34-2 efficiency testing standards using stray load losses in low-voltage three-phase, cage induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 2, pp. 608-614, 2002. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=993186>
- [13] J. Hsu, J. Kueck, M. Olszewski, D. Casada, P. Otaduy, and L. Tolbert, "Comparison of induction motor field efficiency evaluation methods," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 1, pp. 117-125, 1998. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=658732>
- [14] L. Tolbert, J.D.Kueck, M.Oldzewski, D. A. Casada, J.Hsu, and P. Otaduy, "Assessment of Methods for Estimating Motor Efficiency and Load Under Field Conditions," Oak Ridge Nat. Lab., Oak Ridge, TN, Oak Ridge National Laboratory Rep. ORNL/TM-13165, Tech. Rep., 1996.
- [15] J. D. A. Wallace, A. Von Jouanne, E. Wiedenbrug, E. Matheson, "A Laboratory Assessment of In-Service and Nonintrusive Motor Efficiency Testing Methods," *Electric Power Components and Systems*, vol. 29, no. 6, pp. 517-529, Jun. 2001.

[16] J. Kueck, "Development of a method for estimating motor efficiency and analyzing motor condition," in Pulp and Paper Industry Technical Conference, 1998. Conference Record of 1998 Annual, June 1998, pp. 67-72.

[17] BDMotor, Software para Viabilizar Economia de Energia em Motores de Indução Trifásicos, versão 4.21, Eletrobrás/PROCEL, 2008;

[18] J. Hsu and B. Scoggins, "Field test of motor efficiency and load changes through air-gap torque," Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 10, no. 3, pp. 477-483, Sep 1995.

[19] B. Lu, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "A Nonintrusive and In-Service Motor Efficiency Estimation Method using Air-Gap Torque with Considerations of Condition Monitoring," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 44, no. 6, pp. 1666-1674 2008

[20] MotorMaster+ 4.0 User's Guide Washington State University (WSU) Cooperative Extension Energy Program with the support of the U.S. Department of Energy (USDOE).

[21] E. Agamloh, A. K. Wallace, A. VonJouanne, K. Anderson, and J. Rooks, "Assessment of Nonintrusive Motor Efficiency Estimators," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 1, pp. 127-133, Jan. 2005. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1388670>

[22] Linden, R. Algoritmos Genéticos. 2. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2008. v. 1. 372 p.

[23] Goldberg, D. E.. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Boston: Addison-Wesley, c1989. xii, 412p. ISBN 0201157675 (enc).

[24] A. Charette, J. Xu, A. Ba-Razzouk, P. Pillay, and V. Rajagopalan, "The use of the genetic algorithm for in-situ efficiency measurement of an induction motor," in Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, vol. 1, 2000, pp. 392397 vol.1.

- [25] P. Pillay, V. Levin, P. Otaduy, and J. Kueck, "In-situ induction motor efficiency determination using the genetic algorithm," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 13, no. 4, pp. 326-333, dec 1998.
- [26] T. Phumiphak and C. Chat-uthai, "Estimation of induction motor parameters based on field test coupled with genetic algorithm," in *Power System Technology, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on*, vol. 2, 2002, pp. 1199-1203 vol.2.
- [27] M. Aspilli, S. Shetagar, and S. Kodad, "Estimation of induction motor field efficiency for energy audit and management using genetic algorithm," in *Sensing Technology, 2008. ICST 2008. 3rd International Conference on*, 30 2008-dec. 3 2008, pp. 440-445.
- [28] S. Jangjit and P. Laohachai, "Parameter Estimation of Three-Phase Induction Motor by Using Genetic Algorithm," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 360-364, 2009.
- [29] A. Siraki and P. Pillay, "An in situ efficiency estimation technique for induction machines working with unbalanced supplies," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 27, no. 1, pp. 85-95, march 2012.
- [30] B. Lu, T. Valley, I. French, K. J. Bradley, and T. G. Habetler, "Non-Intrusive Efficiency Determination of In-Service Induction Motors using Genetic Algorithm and Air-Gap Torque Methods," *Science And Technology*, pp. 1186-1192, 2007.
- [31] R. H. C. Takahashi, J. A. Vasconcelos, J. A. Ramirez, and L. Krahenbuhl, "A multiobjective methodology for evaluating genetic operators", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, N° 3, pp.1321 -1324 2003
- [32] B. Lu, T.G. Habetler, R.G. Harley, "A Nonintrusive Efficiency Estimation Method for In-Service Motor Testing using a Modified Induction Motor Equivalent Circuit," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2006.

- [33] M. Çunkas, T. Sag, "Efficiency determination of induction motors using multi-objective evolutionary algorithms," *Advances in Engineering Software* 41, 2010.
- [34] J. R. Gomez, E. C. Quispe, M. A. de Armas, P. R. Viego, "Estimation of induction motor efficiency in-situ under unbalanced voltages using genetic algorithms," *18th International Conference on Electrical Machines*, 2008.
- [35] M. Torrent, "Estimation of equivalent circuits for induction motors in steady state including mechanical and stray load losses," *European Transactions on Electrical Power*, 2012.
- [36] WEG. Motores Elétricos: Linhas de Produtos, Características, Especificações, Instalações, Manutenções. Modificação 050.04/112006. Jaraguá do Sul, jun. 2005. p. B-3.
- [37] J. M. C. Guimarães, J. V. Bernardes, Jr., A. E. Hermeto, E. Bortoni, "Parameter Determination of Asynchronous Machines from Manufactor data sheet," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 29. NO. 3, September 2014. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6811221>
- [38] R. Natarajan, V. K. Misra, "Parameter Estimation of Induction Motors Using a Spreadsheet Program on a Personal Computer, " *Electric Power Suystems Research*, 16 (1989) 157-164.
- [39] K. Hurst and T. Habetler, "Sensorless speed measurement using current harmonic spectral estimation in induction machine drives," in *Power Electronics Specialists Conference, PESC '94 Record., 25th Annual IEEE*, jun 1994, pp. 10-15 vol.1.
- [40] Siemens S. A. Motores Trifásicos de Baixa Tensão. 2010. [Online]. Available: http://w3.siemens.com.br/drives/br/pt/motores-eletricos/motores-baixa-tensao/motores-abnt-ate-315l/Documents/Catalogo_de_Motores_ABNT_ind1_dt.pdf